

# Trabajo Fin de Máster Máster en Ingeniería Aeronáutica

## Fabricación y caracterización de piezas de material compuesto realizadas en impresora 3D

Autor: Carmen Briosó Díez

Tutor: Jesús Justo Estebaranz

**Dep. Elasticidad y Resistencia de Materiales**  
**Escuela Técnica Superior de Ingeniería**  
**Universidad de Sevilla**

Sevilla, 2016







Trabajo Fin de Máster  
Máster en Ingeniería Aeronáutica

# **Fabricación y caracterización de piezas de material compuesto realizadas en impresora 3D**

Autor:

Carmen Briosó Díez

Tutor:

Jesús Justo Estebaranz

Profesor Ayudante Doctor

Dep. Elasticidad y Resistencia de Materiales  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2016



Trabajo Fin de Máster:    Fabricación y caracterización de piezas de material compuesto realizadas en impresora 3D

Autor:            Carmen Brioso Díez

Tutor:            Jesús Justo Estebaranz

El tribunal nombrado para juzgar el trabajo arriba indicado, compuesto por los siguientes profesores:

Presidente:

Vocal/es:

Secretario:

acuerdan otorgarle la calificación de:

El Secretario del Tribunal

Fecha:



# Agradecimientos

---

Este trabajo no habría sido posible sin la formación recibida a lo largo de todos estos años en la Escuela. Son innumerables los profesores que me han ayudado a adquirir los conocimientos que ahora poseo, que a base de sacrificio y esfuerzo he conseguido.

Como culmen de mi formación, agradecer a mi tutor Jesús Justo su comprensión y paciencia junto a su buen enseñar, sin él no hubiera sido posible este trabajo.

A todos los miembros del LERM y en particular a Antonio Cañas, Isabel, José Ramón y Miguel por incluirme entre ellos como una más. Gracias a todos.

A los compañeros con los que he coincidido en el laboratorio Laura, Patricia, Almudena y Leo con los que espero volver a coincidir en el futuro.

A mis padres, y también a Manuel y Alberto por la confianza depositada en mi.



# Resumen

---

Dentro de la fabricación aditiva, la impresión 3D de materiales plásticos es un proceso en auge en la actualidad. Las ventajas que presenta en la fabricación de geometrías completas, la alta personalización de los productos, además de la inmediatez percibida en el proceso la hace firme candidata a generar una nueva revolución industrial. Sin embargo, para aplicaciones que requieran componentes resistentes, no es una opción válida.

Con esta idea surge la impresión 3D con refuerzos de filamentos de fibra. De esta forma se pueden fabricar piezas funcionales con buenas características.

El objetivo de este trabajo ha sido profundizar en el conocimiento de la impresora Mark One<sup>®</sup>, desde la caracterización de los materiales, al estudio de posibilidades en piezas reales.





# Abstract

---

**T**he additive manufacturing, 3D printing of plastic materials is a growing process today. The advantages in the manufacture of complex geometries, high customization of products, in addition, to the perceived immediacy in the process makes it a strong candidate to generate a new industrial revolution. However, for requiring rugged application, it is not a valid option.

Fiber reinforcement during 3D printing arise to improve the characteristics of functional parts.

The objectice of this work has been to study in depth the printer Mark One<sup>®</sup>, from the characterization of materials to the study of possibilities in actual pieces.



# Índice

---

<i>Resumen</i>	III
<i>Abstract</i>	V
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Sectores en los que se aplica	2
1.2. Impresión de filamento de fibra	4
1.3. Objeto del trabajo	6
1.4. Estructura del documento	6
<b>2. Geometrías estudiadas</b>	<b>7</b>
2.1. Pieza 1: Paralelepípedo de nylon	7
2.2. Pieza 2: Tubos	11
2.3. Pieza 3: Panel de fibra de carbono	20
2.4. Pieza 4: Probetas de nylon	32
2.5. Pieza 5: Probetas de fibra de vidrio	39
2.6. Pieza 6: Probeta con pregrieta	47
2.7. Pieza 7: Pieza para máquina de ensayos	50
2.8. Pieza 8: Moldes	52
2.9. Pieza 9: Panel escalonado	56
<b>3. Aspectos destacados del estudio</b>	<b>59</b>
3.1. Resumen de propiedades obtenidas	59
3.2. Tiempos de fabricación	60
<b>4. Mantenimiento de la impresora Mark One®</b>	<b>63</b>
4.1. Limpieza del sistema de nylon	63
4.2. Calibración del nylon	68
4.3. Desatasco y limpieza de la boquilla de fibra	69
4.4. Desatasco y limpieza del tubo Bowden	71
4.5. Desatasco y limpieza de la extrusora de fibra	71
4.6. Nivelación de la cama de impresión	73
<b>5. Dificultades encontradas</b>	<b>75</b>

5.1. Piezas de nylon	75
5.2. Piezas de fibra	75
5.3. Dificultades generales	76
<b>6. Recomendaciones de impresión</b>	<b>79</b>
<b>7. Conclusiones y desarrollos futuros</b>	<b>81</b>
7.1. Conclusiones	81
7.2. Desarrollos futuros	82
<b>Apéndice A. Otros trabajos realizados</b>	<b>85</b>
A.1. Actualización del firmware	85
<b>Apéndice B. Planos</b>	<b>87</b>
<i>Índice de Figuras</i>	93
<i>Índice de Tablas</i>	97
<i>Bibliografía</i>	99

# 1 Introducción

---

La *Fabricación Aditiva* consiste en manipular material a escala micromecánica y depositarlo con elevada precisión para conformar un sólido.

En el último cuarto del siglo XX surgen las tecnologías de fabricación aditiva. Suponen un cambio radical respecto a los procesos de fabricación convencionales empleados hasta el momento. Se pasa a fabricar por deposición del material capa a capa, aportándolo exclusivamente allí donde es necesario hasta que finalmente se consigue la geometría deseada.

Existen tecnologías muy diversas que aplican este principio y que permiten obtener piezas directamente desde un archivo CAD. Dentro de las tecnologías se encuentra la impresión 3D, un fenómeno en auge en los últimos años. Sin embargo, no es algo nuevo. Desde que en el año 1983 Charles W. Hull, inventor destacado en el campo de la óptica iónica, ideara la estereolitografía como el primer método de impresión 3D, la tecnología se ha desarrollado creando nuevos métodos de impresión.

Tras la estereolitografía aparecen más tecnologías que se pueden agrupar según la naturaleza del material aportado:

- Procesos basados en líquidos:
  - Impresión por inyección de polímeros (*Polyjet*).
  - Curado en base sólida (*Solid ground curing*).
- Procesos basados en polvos:
  - Sinterizado selectivo con láser (*Selective laser sintering*, SLS).
  - Deposición directa de metal (*Direct metal deposition*, DMD).
- Procesos basados en sólidos:
  - Deposición de material fundido (*fused deposition modelling*, FDM).
  - Fabricación de objetos laminados (*Laminated object manufacturing*, LOM).

Hoy en día, estas tecnologías no se han implantado extensamente en la industria, en parte debido a limitaciones del propio proceso aún no resueltas.

Las principales características que distinguen el proceso de fabricación aditiva de cualquier otro proceso de fabricación industrial son la complejidad geométrica y la personalización.

Una aplicación especialmente destacable de la consecución de geometrías complejas es generar productos aligerados por medio de estructuras internas huecas.

Sin embargo, a pesar de los evidentes avances, existen limitaciones que hacen que estas tecnologías no se hayan implantado de forma generalizada:

- Disponibilidad y coste de materiales: aunque es posible emplear muchos tipos de materiales tanto metálicos como no metálicos, la gama disponible es limitada y el coste de adquisición de los materiales suele ser superior al habitual.
- Acabado superficial de las piezas y velocidad de fabricación: el aumento de la velocidad de fabricación condiciona la calidad del acabado superficial.
- Tamaño limitado de piezas: el volumen de piezas máximo que se puede construir es bastante limitado. Existe un límite superior, pero también uno inferior.
- Desconocimiento de la dinámica del proceso: no es todavía una tecnología madura y son escasos los trabajos de investigación, sobre todo, en el caso de metales y materiales compuestos.

Como se extrae de [22], como punto importante hay que destacar el valor frente al coste de la tecnología. Para determinar correctamente el coste real de una pieza fabricada con estas tecnologías se debe atender a cinco conceptos:

1. Coste de material: es bastante más caro que el material de iguales características empleado en procesos convencionales.
2. Coste de personal: el personal dedicado debe tener gran especialización.
3. Coste de amortización de la maquinaria: en general la maquinaria requiere una inversión elevada.
4. Coste de tecnología periférica: no es suficiente con la máquina de fabricación aditiva, es necesario poder manejar/generar ficheros digitales con los modelos que hay que reproducir.
5. Costes indirectos: gasto de formación del personal, consumo de energía, costes de no calidad o gastos generales asociados.

## **1.1 Sectores en los que se aplica**

Frente a los procesos convencionales, la fabricación aditiva cuenta con ventajas que la hacen muy atractiva para determinados sectores. Se detallan a continuación algunos de los sectores y aplicaciones en los que se emplean estas tecnologías.

- **Sector de la salud**

Esta tecnología permite la fabricación de medicamentos con dosis personalizadas para cada paciente [9]. Además, las pastillas son mecánicamente más fuertes y no tienen una degradación térmica significativa durante el proceso de impresión.

El desarrollo de medicamentos personalizados para cada paciente requiere una tecnología capaz de fabricar un bajo número de dosis. El potencial en el área sanitaria

es elevado, ya que pueden existir dos tipos de soluciones, imprimir sobre un sustrato o fabricar directamente la dosis.



**Figura 1.1** Pastillas fabricadas en impresora 3D.

Existe una familiaridad entre los sistemas de captura de datos sanitarios y las técnicas de tratamiento de ficheros necesarias para la fabricación aditiva y es posible integrarlos con relativa facilidad.

La aplicación más visible quizás sean las prótesis, implantes y biomodelos, piezas únicas y muy complejas geométricamente. Una de las prácticas que más se está extendiendo es la reproducción de partes del cuerpo de un paciente, a modo de prototipo, que permita al cirujano planificar la intervención quirúrgica. De esta forma se reduce el riesgo de errores y replanificaciones durante la operación y limita al mínimo el tiempo de exposición en el quirófano.

- **Competiciones deportivas**

Son numerosas las competiciones en las que la impresión 3D está presente. Además es un plus el poder disponer de nuevos rediseños en un tiempo reducido.

El futuro de la Fórmula 1 pasa por esta tecnología. El equipo Red Bull imprime alrededor del 80% de las partes de los prototipos que posteriormente son probados en el túnel del viento.

Durante los Juegos Olímpicos de Río de Janeiro 2016, el equipo ciclista de Francia utilizó un manillar adaptado a cada ciclista e impreso en 3D. Para llegar a construir este manillar, se probó primero uno realizado en arcilla en el túnel del viento. Posteriormente fue escaneado en 3D y una vez fabricado por la impresora, estudiado y modificado para generar la mínima resistencia.

Esto pone de manifiesto como la unión escáner 3D-impresora 3D, va a revolucionar la fabricación.

- **Electrónica**

La tecnología en el campo de la electrónica se puede utilizar para fabricar componentes conductivos [18].

Para el sector electrónico es fundamental la miniaturización y precisión, ambas características que le puede ofrecer este tipo de fabricación.

- **Consumo personal**

Numerosos especialistas en la materia pronostican que en un futuro no muy lejano, cada hogar tendrán una impresora 3D para fabricar repuestos o simplemente objetos previamente diseñados; accesorios de cocina, juguetes, repuestos etc.

Incluso existe tiendas en las que comercializan gafas cuya montura ha sido fabricada mediante impresión 3D [2].

- **Aeroespacial y militar**

Las tecnologías de fabricación aditiva tienen un buen encaje con los requerimientos del sector.

Bajos volúmenes de fabricación, geometrías complejas y personalización constituyen el escenario ideal. Las primeras piezas que *volaron* fueron componentes de plástico para conducciones de aire. Piezas con geometrías complejas que se adaptan al hueco que les dejan el resto de componentes del avión.

Prueba de esto es que Airbus imprimió en 3D más de mil piezas para el A350, reduciendo el peso, el número de piezas, las restricciones de diseño y los riesgos de la cadena de suministros [3]. Además, ha presentado el primer avión del mundo fabricado en una estructura impresa en 3D, que ya ha completado satisfactoriamente pruebas de vuelo [figura 1.2](#).



**Figura 1.2** Prototipo de THOR (Testing High-Tech Objectives in Reality).

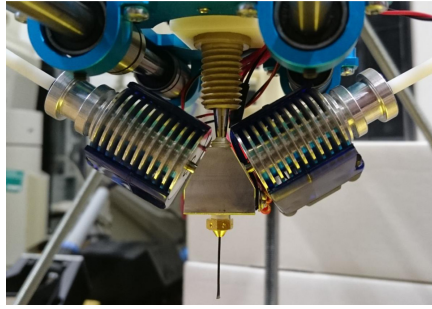
## 1.2 Impresión de filamento de fibra

La continua reducción en el ciclo de vida de los productos actuales supone nuevos retos para el desarrollo del producto. Los procesos de fabricación aditiva deben ser capaces de llevar a cabo un desarrollo más rápido de la producción de muestras y prototipos. Normalmente, las propiedades del material de los componentes producidos por las impresoras 3D comunes son insuficientes para prototipos funcionales. Una forma de mejorar las propiedades de los plásticos es reforzándolos con filamentos de fibra.

La primera impresora 3D en utilizar filamentos de fibra es la Mark One<sup>®</sup> de la empresa Markforged. Puede imprimir fibra de carbono, de vidrio y Kevlar. Esta impresora está restringida a imprimir capas completas de fibra con refuerzo continuo y en una dirección.

Existe un prototipo de impresora 3D [16] en el que se puede controlar el ratio del volumen de fibra frente al de matriz durante el proceso de impresión. Además, en este prototipo la matriz se añade por otro cabezal distinto al de la fibra ([figura 1.3](#)).





**Figura 1.3** Prototipo del cabezal.

Otro equipo de investigación ha conseguido reforzar un termoplástico con fibra de carbono continua [20]. En este caso, el filamento de termoplástico y el de fibra se suministran separadamente y se mezclan posteriormente en el calentador antes de la salida.

## 1.3 Objeto del trabajo

Los objetivos del trabajo han tenido como hilo conductor profundizar en el conocimiento de la impresora Mark One® y más concretamente:

- Caracterización de materiales.
- Utilización conjunta con métodos convencionales de fabricación de materiales compuestos.
- Estudio de posibilidades en piezas reales.
- Realización de tareas de mantenimiento.
- Mejora de la calidad de las geometrías impresas.

Los materiales que se han utilizado en las impresiones llevadas a cabo han sido nylon, fibra de carbono y fibra de vidrio. Todos los materiales son suministrados por el fabricante.

Los trabajos llevados a cabo complementan los ya realizados por María José Mesa Quesada en el trabajo titulado *Puesta a punto de un sistema de fabricación aditiva para materiales compuestos* [21].

## 1.4 Estructura del documento

El documento se estructura en siete capítulos.

En el [capítulo 2](#) se detallan las piezas estudiadas. Para cada una de las piezas se recogen los pasos seguidos: diseño, fabricación, ensayos y/o aplicaciones y tiempo de ejecución.

Los aspectos destacados durante el desarrollo del trabajo se recogen en el [capítulo 3](#).

No se aprende sobre un tema hasta que no se enfrentan labores de mantenimiento, dificultades, se extraen recomendaciones y futuras líneas de investigación fruto del trabajo. Todo esto se trata en el [capítulo 4](#), [capítulo 5](#), [capítulo 6](#) y [capítulo 7](#), respectivamente.

Para finalizar el trabajo se incluyen dos apéndices que recogen otros trabajos realizados (apéndice [A](#)) y planos (apéndice [B](#)) profundizando en algunas de las geometrías estudiadas.

## 2 Geometrías estudiadas

---

A lo largo de esta sección se recogen las geometrías realizadas, su diseño, fabricación, los ensayos y/o aplicaciones y el tiempo empleado en su diseño y fabricación.

### 2.1 Pieza 1: Paralelepípedo de nylon

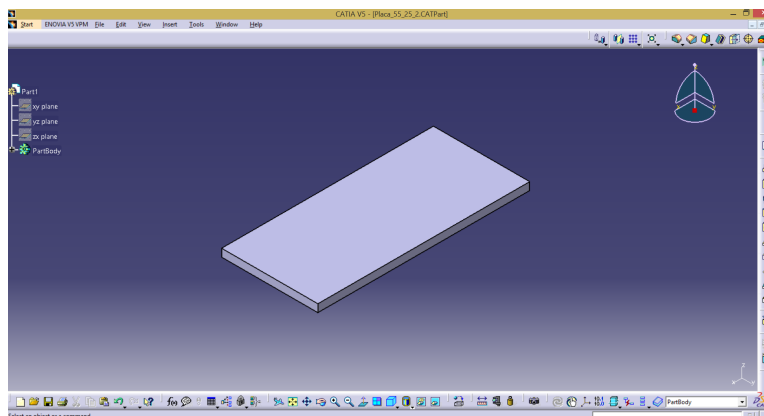
La primera geometría considerada para el diseño y posterior fabricación fue un paralelepípedo. Se comenzó con una geometría sencilla para empezar a manejar el software Catia® y con la fabricación se pretendió controlar los parámetros del software Eiger® para personalizar el tipo de material y mallado disponibles.

Como continuación de los trabajos realizados en [21], para obtener las propiedades del nylon como un material isótropo se propone realizar una pieza de nylon con los distintos mallados disponibles en el software Eiger®. Posteriormente fundirla en un horno y conseguir así un volumen de nylon sólido e isótropo.

Para terminar la caracterización del nylon se obtuvo una probeta con filamento de nylon en una sola dirección y así poder obtener las propiedades a tracción.

#### 2.1.1 Diseño en el software Catia®

En primer lugar, se diseñó una probeta que se adaptara a un molde metálico. Las dimensiones en milímetros del paralelepípedo apto para el molde fueron 55x25x2.



**Figura 2.1** Geometría para fundir posteriormente.

### 2.1.2 Fabricación con la impresora Mark One®

Las características de fabricación seleccionadas en el software Eiger® fueron un mallado rectangular con una densidad del 100 %, obteniéndose la pieza mostrada en [figura 2.2](#). Aún así, la pieza no es completamente maciza, por ello se decidió fundirla en un molde y conseguir así una probeta totalmente compacta.



**Figura 2.2** Geometría para fundir fabricada.

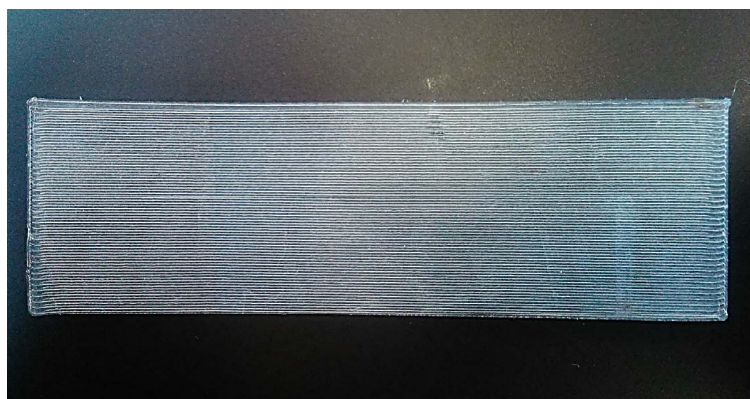
También se imprimió una probeta que constaba de una única capa de material.

En segundo lugar, se imprimió una probeta que constara de una única capa de material y que careciera de capa inferior y superior, esperando así obtener una probeta de nylon con fibras en una sola dirección y ensayarla a tracción.



**Figura 2.3** Probeta de nylon de una sola capa.

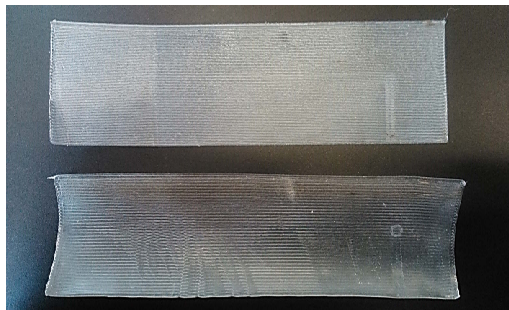
Se puede observar en la [figura 2.3](#) que la probeta obtenida por este método no es la más adecuada para realizar el ensayo de tracción.



**Figura 2.4** Probeta de nylon de una sola capa direccionada.

En tercer lugar, se obtuvo una probeta de una única capa en la que se consiguió dar dirección al nylon (figura 2.4).

De este tipo se realizaron dos probetas cuya única diferencia fue la nivelación de la cama y la altura de la boquilla de fibra. En el primer intento la altura de la boquilla de fibra no era la correcta y dejó una marca en la probeta.



**Figura 2.5** Probetas de nylon de una sola capa direccionadas.

La primera de las probetas es la de abajo en la figura 2.5, en la que se puede apreciar una marca circular en la zona de la derecha provocada por la boquilla de fibra.

### 2.1.3 Ensayos y aplicaciones

Por las características de la impresión, nunca va a ser posible obtener una pieza isótropa de nylon, ya que dentro de la misma capa las propiedades variarán según en tipo de mallado que se utilice y entre capas diferirán de las obtenidas en un plano.

Una vez obtenida la probeta, el conjunto se sometió a temperatura en el horno con el propósito de que el nylon fluyera por el molde y al enfriarse conformara una probeta sólida e isótropa.

A la hora de establecer la temperatura del horno se tuvo en cuenta la temperatura a la que la impresora deposita el nylon fundido (263°C), por lo tanto, se decidió comenzar con un ciclo de 30 minutos a 200°C y observar que ocurría. Si no se conseguía la fusión se aumentaría progresivamente la temperatura manteniendo el tiempo de los ciclos. De esta forma, los ciclos proporcionados fueron:

- 30 minutos a 200°C.
- 30 minutos a 220°C.
- 30 minutos a 240°C.

Tras ellos, la probeta únicamente se ennegreció superficialmente sin llegar a fluir por el molde.

Se desechó la probeta y se imprimió una nueva para aplicar al conjunto, además de temperatura, presión.

En este caso los ciclos fueron:

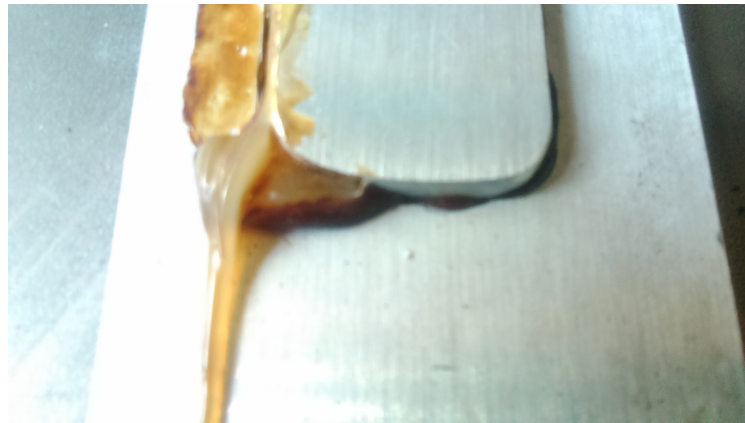
- 30 minutos a 240°C.
- 30 minutos a 243°C.
- 30 minutos a 247°C, sin presión.

- 30 min a 250°C.

Tras estos ciclos, el material fluyó por el molde y se calcinó (figura 2.7).



**Figura 2.6** Molde y aplicador de presión con nylon fundido.



**Figura 2.7** Probeta de nylon fundida y calcinada.

No se consiguió obtener un volumen isótropo de material, únicamente se pudo observar la capacidad de fluencia del material.

#### 2.1.4 Tiempos de diseño y fabricación

Se recogen en la tabla 2.1 los tiempos empleados. En este caso, el tiempo de diseño no es relevante ni limitante, ya que la geometría es sencilla.

**Tabla 2.1** Tiempos empleados en el diseño y fabricación de la pieza 1.

Catia®	Tiempo Eiger®	Tiempo Mark One®	Total
1min	41min	32min	33min

La diferencia en el tiempo estipulado entre el software y el de la impresora tampoco es destacable.



## 2.2 Pieza 2: Tubos

Un objetivo marcado ha sido la impresión de tubos. Se han fabricado tanto en nylon como de fibra, para someterlos a compresión y conocer el comportamiento del material.

La altura de los tubos se pretendió que fuera la máxima posible, para observar la calidad de la impresión de piezas de dimensiones límite.

En los tubos de nylon se distinguió entre dos mallados, ambos con una densidad del 100%. Además, se imprimieron tubos de fibra de vidrio y fibra de carbono. Debido a problemas con la impresión, la altura de los tubos variará de la inicialmente deseada.

Se quiso fabricar tubos con el diámetro y el espesor mínimos y la altura máxima posibles, por lo que previamente se realizó un estudio de las dimensiones limitantes en el software Eiger®.

### 2.2.1 Diseño en el software Catia®

Estudiando las limitaciones de impresión, se realizó en primer lugar, un estudio para determinar las dimensiones de los tubos.

El diámetro de los tubos está limitado por la rigidez de la fibra, concretamente por la de carbono. En cuanto a la altura de los tubos, se quería probar a imprimir piezas con la máxima altura admisible de impresión.

Para estudiar la relación entre el diámetro y el espesor de los tubos se diseñaron en Catia® distintos aros en los que, manteniendo el diámetro exterior, se variaba el espesor. La altura de todos ellos se estableció en 2mm.

Los resultados obtenidos se muestran en las siguientes tablas (tabla 2.2 - tabla 2.6) donde se recoge el diámetro y el espesor de cada aro. En la columna *TEST, OK* corresponde a un aro válido para la impresión y *Fail* significa impresión errónea.

Impresión errónea indica que la impresora no es capaz de colocar fibra en la geometría. Refleja el aviso (figura 2.8) proporcionado por el software al detectar que no puede colocar fibra en la pieza. En este caso en estudio, la incapacidad para colocar fibra es fruto de la rigidez de la fibra que impide alcanzar los radios de giro del diseño.

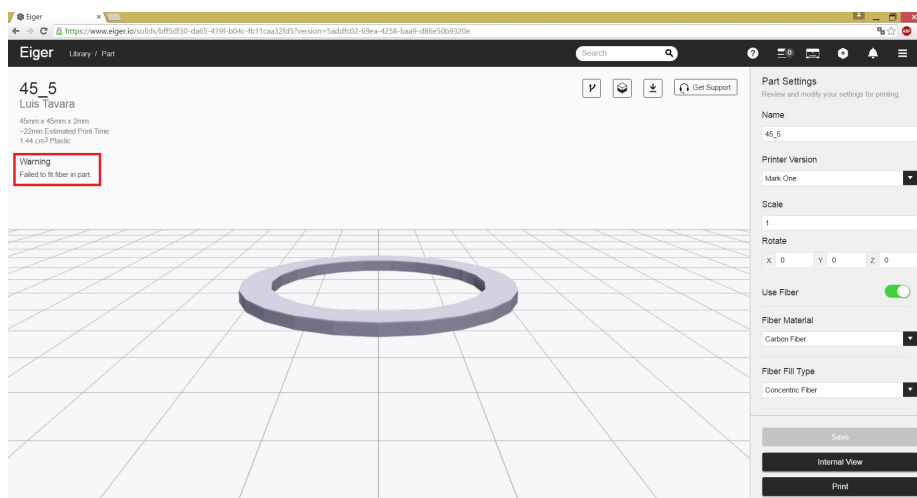


Figura 2.8 Mensaje de aviso.

**Tabla 2.2** Diámetro 100mm.

<b>ESTUDIO DIMENSIONES</b>						
Archivo	Descripción	Diámetro [mm]	Espesor [mm]	Altura [mm]	Vplastic/Vfiber [cm <sup>3</sup> ]	TEST
100_3	Aro	100	3	2	2,52/0,33	OK
100_4	Aro	100	4	2	2,77/0,49	OK
100_5	Aro	100	5	2	3,03/0,65	OK
100_6	Aro	100	6	2	3,31/0,65	OK
100_7	Aro	100	7	2	3,59/0,65	OK
100_10	Aro	100	10	2	4,44/0,65	OK
100_15	Aro	100	15	2	5,72/0,65	OK
100_20	Aro	100	20	2	6,79/0,65	OK

**Tabla 2.3** Diámetros 95 y 90mm.

<b>ESTUDIO DIMENSIONES</b>						
Archivo	Descripción	Diámetro [mm]	Espesor [mm]	Altura [mm]	Vplastic/Vfiber [cm <sup>3</sup> ]	TEST
95_3	Aro	95	3	2	2,57/-	Fail
95_4	Aro	95	4	2	2,60/0,47	OK
95_5	Aro	95	5	2	2,83/0,62	OK
95_6	Aro	95	6	2	3,16/0,62	OK
90_5	Aro	90	5	2	2,94/-	Fail
90_6	Aro	90	6	2	2,94/0,58	OK
90_7	Aro	90	7	2	3,21/0,58	OK
90_8	Aro	90	8	2	3,46/0,58	OK
90_9	Aro	90	9	2	3,71/0,58	OK
90_10	Aro	90	10	2	3,97/0,58	OK

**Tabla 2.4** Diámetro 85mm.

<b>ESTUDIO DIMENSIONES</b>						
Archivo	Descripción	Diámetro [mm]	Espesor [mm]	Altura [mm]	Vplastic/Vfiber [cm <sup>3</sup> ]	TEST
85_3	Aro	85	3	2	2,23/-	Fail
85_4	Aro	85	4	2	2,37/0,42	OK
85_5	Aro	85	5	2	2,50/0,55	OK
85_6	Aro	85	6	2	2,74/0,55	OK
85_7	Aro	85	7	2	3,06/0,55	OK
85_8	Aro	85	8	2	3,26/0,55	OK
85_9	Aro	85	9	2	3,46/0,55	OK
85_10	Aro	85	10	2	3,70/0,55	OK



**Tabla 2.5** Diámetros 80, 75 y 70mm.

ESTUDIO DIMENSIONES						
Archivo	Descripción	Diámetro [mm]	Espesor [mm]	Altura [mm]	Vplastic/Vfiber [cm <sup>3</sup> ]	TEST
80_3	Aro	80	3	2	2,15/-	Fail
80_4	Aro	80	4	2	2,20/0,39	OK
80_5	Aro	80	5	2	2,40/0,51	OK
75_3	Aro	75	3	2	2,01/-	Fail
75_4	Aro	75	4	2	2,06/0,36	OK
75_5	Aro	75	5	2	2,24/0,48	OK
70_3	Aro	70	3	2	1,90/-	Fail
70_4	Aro	70	4	2	1,93/0,34	OK
70_5	Aro	70	5	2	2,06/0,45	OK

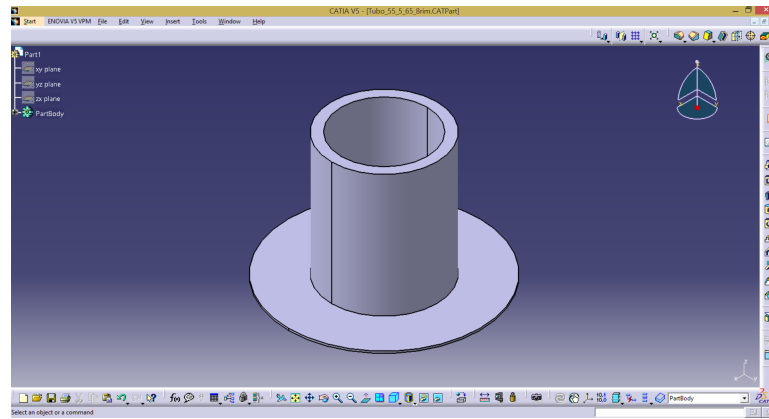
**Tabla 2.6** Diámetros 65, 60 y 55 mm.

ESTUDIO DIMENSIONES						
Archivo	Descripción	Diámetro [mm]	Espesor [mm]	Altura [mm]	Vplastic/Vfiber [cm <sup>3</sup> ]	TEST
65_4	Aro	65	4	2	1,94/-	Fail
65_5	Aro	65	5	2	1,90/0,41	OK
60_4	Aro	60	4	2	1,80/-	Fail
60_5	Aro	60	5	2	1,77/0,38	OK
60_6	Aro	60	6	2	1,92/0,38	OK
55_4	Aro	55	4	2	1,63/-	Fail
55_5	Aro	55	5	2	1,65/0,34	OK
55_6	Aro	55	6	2	1,78/0,34	OK

**Tabla 2.7** Resultados obtenidos.

Diámetro [mm]	100	95	90	85	80	75	70	65	60	55	50	45
Espesor [mm]	-	4	6	4	4	4	4	5	5	5	-	-

Cabe mencionar, que no solo está restringido el diámetro de los tubos por la rigidez de la fibra de carbono. Hay que tener en presente las características de impresión de la máquina. Se sabe que al imprimir fibra, la máquina imprime la capa de principio a fin, por lo que calcula cuando tiene que cortar el material teniendo en cuenta que la extrusora dista de los cabezales de impresión una distancia determinada. Por lo tanto, teniendo en cuenta esa distancia, es imposible imprimir una capa de fibra que utilice una longitud de material inferior a la distancia existente entre donde se produce el corte y el cabezal de impresión, ya que de lo contrario quedaría material por los conductos de la impresora.



**Figura 2.9** Diseño de los tubos que se fabricarán.

Por lo tanto, se van a realizar tubos de diámetro exterior 55mm, espesor 5mm y altura 150mm en nylon con mallado rectangular y triangular con una densidad del 100 %, en fibra de carbono y en fibra de vidrio (figura 2.9).

### 2.2.2 Fabricación con la impresora Mark One®

El orden de impresión fue el siguiente:

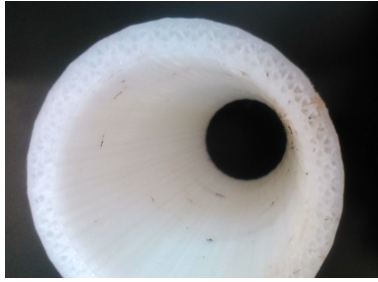
- Tubo de nylon con patrón de mallado triangular y densidad 100 %.
- Tubo de nylon con patrón de mallado rectangular y densidad 100 %.
- Tubo de fibra de vidrio.
- Tubo de fibra de carbono.

#### Nylon con mallado triangular

La impresión del tubo de nylon con mallado triangular se realizó sin problemas hasta la altura deseada (150mm).



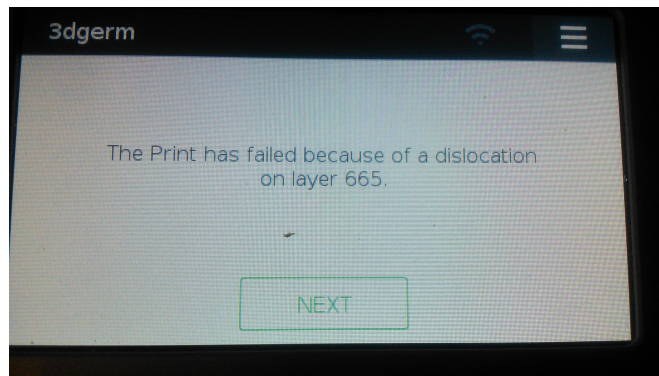
**Figura 2.10** Tubo de nylon con mallado triangular de densidad 100 %.



**Figura 2.11** Detalle del mallado del tubo.

### Nylon con mallado rectangular

Por causas inicialmente desconocidas, la base del tubo se despegó de la cama de impresión, esto provocó que la impresora detectara un fallo en la impresión y no llegara a completar la geometría entera. El fallo que la impresora mostró en la pantalla fue una dislocación (figura 2.12).



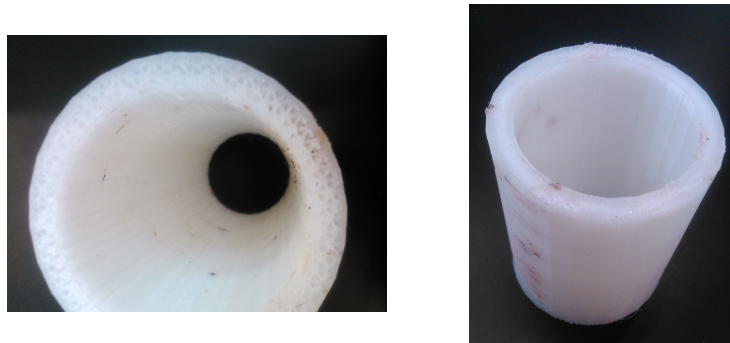
**Figura 2.12** Mensaje de error.

Como se muestra en la figura 2.12, la impresión se paró en la capa 655 de 1500 provocado por una dislocación. Las soluciones sugeridas por el soporte técnico para este problema es incorporar el *Brim* o nivelar la cama de impresión. Puesto que el *Brim* ya se había incorporado, se realizó una nueva nivelación.



**Figura 2.13** Fallo de la impresión provocado por una dislocación.

Aún con el fallo en la impresión, la parte que se pudo recuperar es apta para realizar el ensayo. Se puede observar como el *Brim* utilizado se ha despegado de la propia pieza (figura 2.13). Esta separación se sospecha que fue la causante del fallo de la impresión, ya que al no estar completamente adherido el tubo al *Brim* y a la cama, al depositar el cabezal el material ejerce una fuerza que hace que el tubo se incline, provocando el fallo por dislocación.

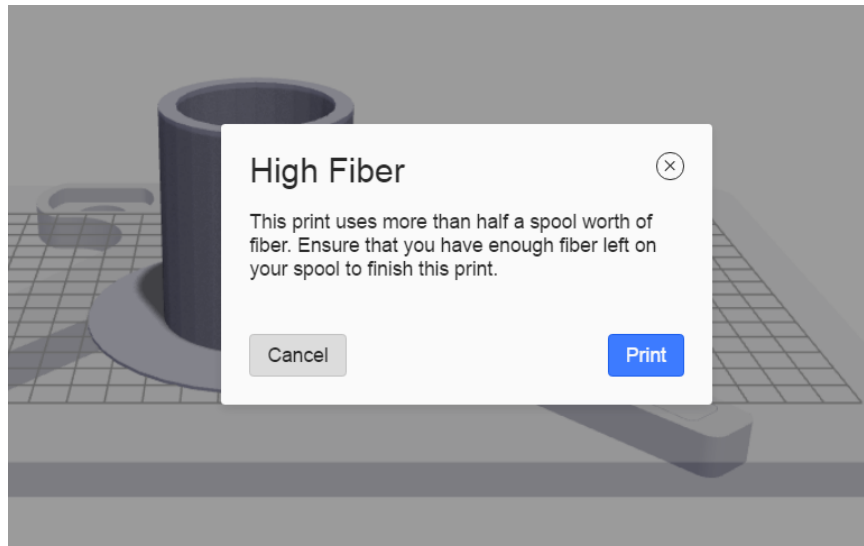


**Figura 2.14** Detalle de los distintos mallados utilizados.

En la figura 2.14 se puede apreciar la diferencia entre los mallados.

#### Fibra de vidrio

Tras el fallo en la impresión del tubo de nylon con mallado rectangular se decidió reducir la altura de los tubos de 150mm a 65.5mm.

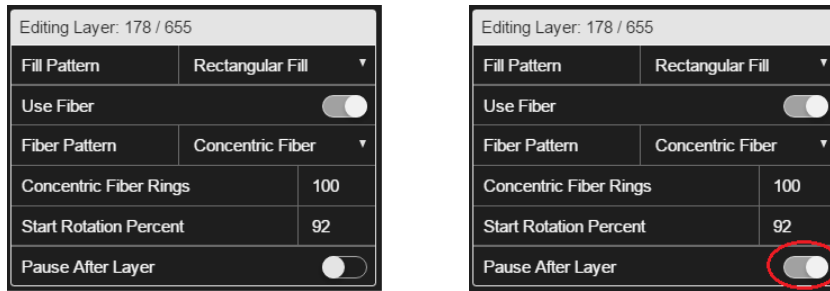


**Figura 2.15** Mensaje de utilización de material.

A la hora de montar el archivo *.mfp* que se cargará posteriormente mediante *USB* a la impresora, el software Eiger<sup>®</sup> muestra un mensaje de aviso cuando la impresión de fibra utiliza más de medio carrete de material (figura 2.15). De forma, que habrá que parar la impresión con una de las dos opciones disponibles:

- Parar desde la pantalla *LCD* durante la impresión.

- Programar la parada desde la edición de la pieza antes de generar el archivo *.mfp* (figura 2.16).



**Figura 2.16** Programación de la parada en el software Eiger®.

### Fibra de carbono

Finalmente, debido a problemas con la impresión, no fue posible imprimir el tubo de fibra de carbono.

### 2.2.3 Ensayos y aplicaciones

Inicialmente los tubos fabricados iban a ser ensayados a presión interna, sin embargo, finalmente se optó por ensayarlos a compresión con la prensa. Se detalla la nomenclatura utilizada:

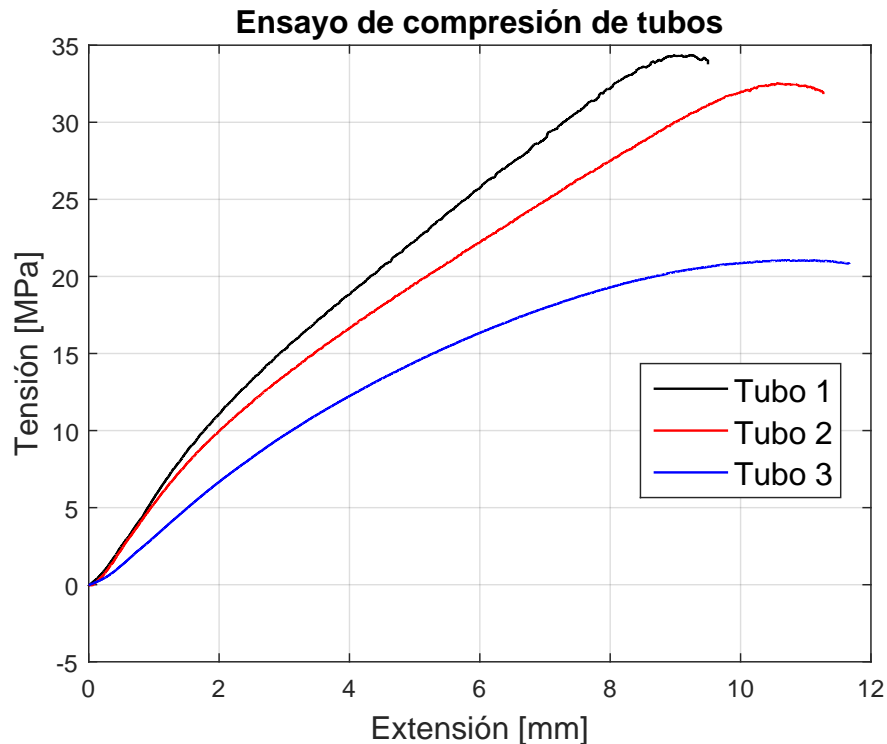
- Tubo 1: tubo de fibra de vidrio con longitud 40mm.
- Tubo 2: tubo de fibra de vidrio con longitud 54.95mm.
- Tubo 3: tubo de nylon con mallado rectangular de densidad 100%.

Las dimensiones de los tubos se recogen en la [tabla 2.8](#). El ensayo se paró cuando los tubos dejaban de soportar carga pero sin llegar a la rotura.

**Tabla 2.8** Dimensiones de los tubos.

Tubo	$D_{ext}$ [mm]	$D_{int}$ [mm]	L inicial [mm]	L ensayo [mm]	L final [mm]
Tubo 1	54.55	45.13	40.00	30.50	37.08
Tubo 2	54.70	45.00	54.95	43.68	51.01
Tubo 3	55.05	43.21	66.16	54.49	63.26

donde  $L_{inicial}$  es la altura del tubo tras su fabricación,  $L_{ensayo}$  es la que alcanza al someterlo a la carga del ensayo y  $L_{final}$  es al retirar la carga, tras la recuperación que experimenta el tubo.



**Figura 2.17** Resultados experimentales ensayo a compresión de tubos.

En la [figura 2.17](#) se representa la gráfica tensión-extensión de los tubos ensayados. La resistencia de cada tubo es:

- Tubo 1: 34.39 MPa
- Tubo 2: 32.53 MPa
- Tubo 3: 21.05MPa

Considerando la diferencia entre la altura de cada tubo antes y después del ensayo ([tabla 2.8](#)), la recuperación que experimenta cada tubo es:

- Tubo 1: 6.58mm.
- Tubo 2: 7.33mm
- Tubo 3: 8.77mm.

A la vista de los resultados obtenidos puede concluirse que el tubo de nylon soporta un nivel de carga inferior, pero se contrae más que los de fibra de vidrio.

Obteniendo la relación de alturas de los tubos de fibra de vidrio de los datos recogidos en la [tabla 2.8](#):

- $\frac{54.95}{40.00} = 1.37375$
- $\frac{51.01}{37.08} = 1.37567$

considerando estos resultados, se extrae que la recuperación que experimentan los tubos no dependen de la altura de éstos. Sin embargo, habría que estudiar si existe una altura mínima/máxima para la que esto deja de ocurrir.



**Figura 2.18** Diferencia de altura durante el ensayo en el tubo 2.



**Figura 2.19** Diferencia de altura durante el ensayo en el tubo 3.

#### 2.2.4 Tiempos de diseño y fabricación

En el tiempo de diseño se considera únicamente el diseño Catia® definitivo. El estudio previo de las dimensiones llevó aproximadamente 4h.

**Tabla 2.9** Tiempos empleados en el diseño y fabricación de la pieza 2.

Tubo	Catia®	Tiempo Eiger®	Tiempo Mark One®	Total
Nylon triangular	2min	17h 42min	19h 32min	19h 34min
Nylon rectangular	2min	1d 1h	1d 30min	1d 32min
Fibra de vidrio	2min	22h 2min	22h 58min	23h



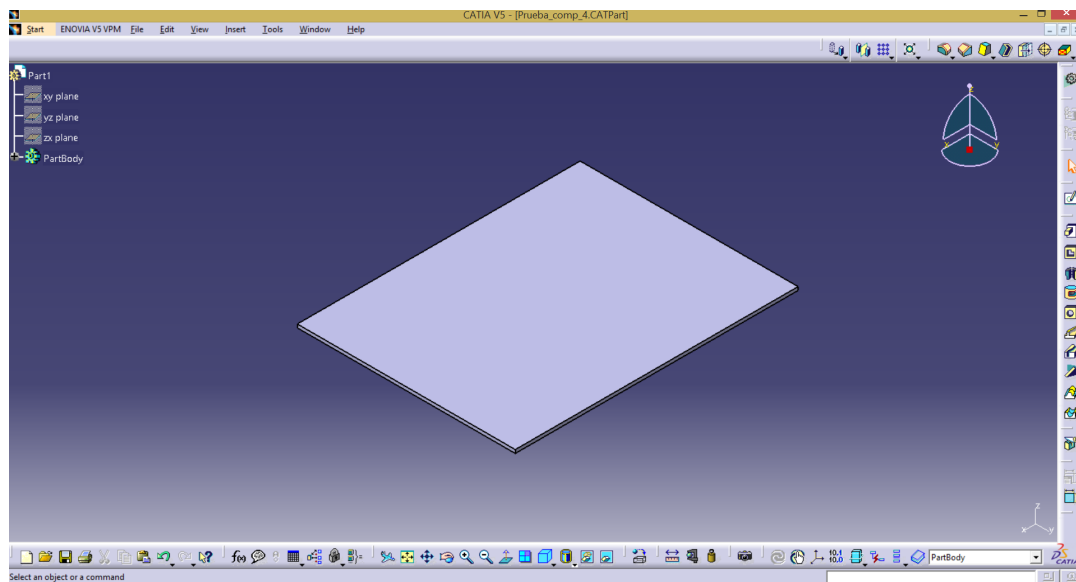
## 2.3 Pieza 3: Panel de fibra de carbono

Para concluir los ensayos de caracterización de la fibra de carbono [21] era necesario obtener probetas de fibra de carbono con orientación  $90^\circ$ . La impresión de probetas de fibra de carbono de forma individual no es posible, por lo que es necesario imprimir un panel y posteriormente obtener las probetas de éste.

Considerando además que, al depositar la fibra de carbono de forma circular el centro del panel queda inutilizado, por lo que la longitud de las probetas que se pueden obtener se reduce a la mitad del ancho del panel.

Las probetas obtenidas se ensayarán a compresión para determinar la resistencia a la compresión y el módulo.

### 2.3.1 Diseño en el software Catia®



**Figura 2.20** Diseño de un panel en Catia®.

Las probetas se diseñaron conforme a la norma, sin embargo, ha sido necesario tener en cuenta las limitaciones a la fabricación impuestas por la cama de impresión.

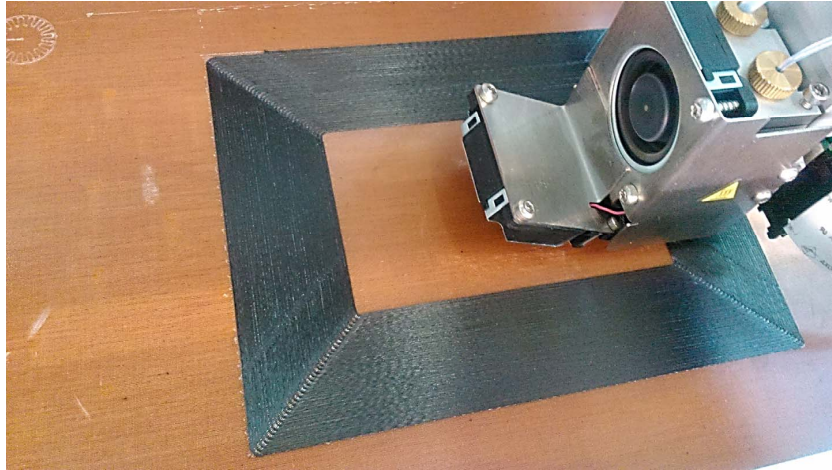
De esta forma, las dimensiones del panel diseñado son 171x131x2 en milímetros.

### 2.3.2 Fabricación con la impresora Mark One®

Como ya se ha mencionado y debido a la particularidad de la impresión de la fibra de carbono, no se pueden obtener probetas de forma individual, por lo que es necesaria la impresión de un panel para su posterior mecanizado.

Puesto que la deposición de la fibra de carbono sigue un patrón circular, las dimensiones de las probetas que se pueden obtener a partir de éste están limitadas por las dimensiones máximas de impresión.





**Figura 2.21** Fabricación del panel de fibra de carbono - I.

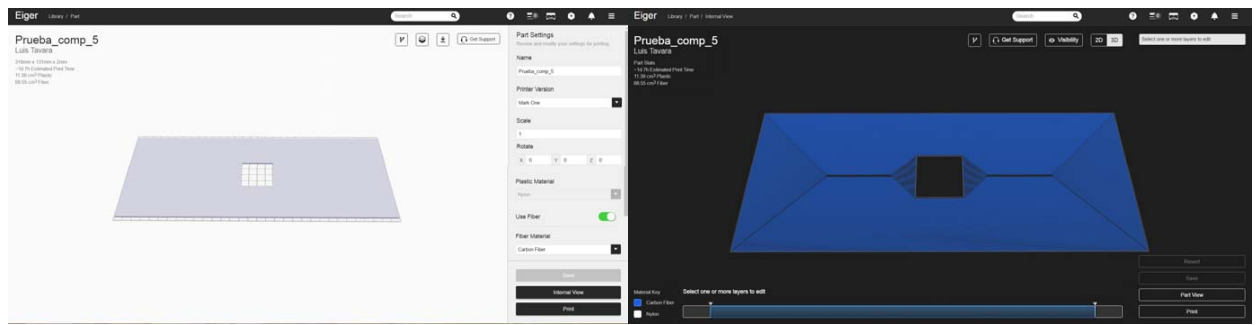
En la [figura 2.21](#) se observa como realiza la impresora el proceso de deposición de la fibra de carbono. En la esquina superior izquierda se sitúa el reloj que denota que la impresión se realiza en fibra.

Para completar los ensayos de caracterización es necesario fabricar probetas con orientación de fibra  $90^\circ$ . La dimensión que restringe el tamaño de las probetas es el ancho de la cama. De esta forma, considerando que el tamaño máximo que se puede imprimir es 320mm x 132mm x 160mm, que la dimensión que va a restringir el largo de las probetas es 132mm y que la zona central se completa con nylon, la máxima longitud de las probetas puede ser 66mm. Empleando la máxima superficie útil de impresión, las dimensiones del panel fabricado fueron 171x131x2 en milímetros ([figura 2.22](#)).

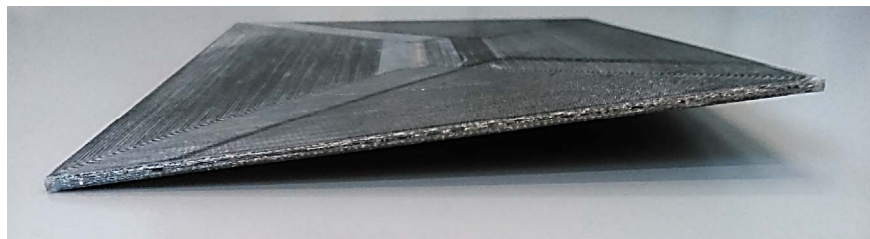


**Figura 2.22** Fabricación del panel de fibra de carbono - II.

Se estudiaron distintos diseños en el software Eiger<sup>®</sup> para intentar evitar el desperdicio de material y la inclusión de la zona central de nylon, pero ninguno consiguió suavizar estas limitaciones ([figura 2.23](#)).

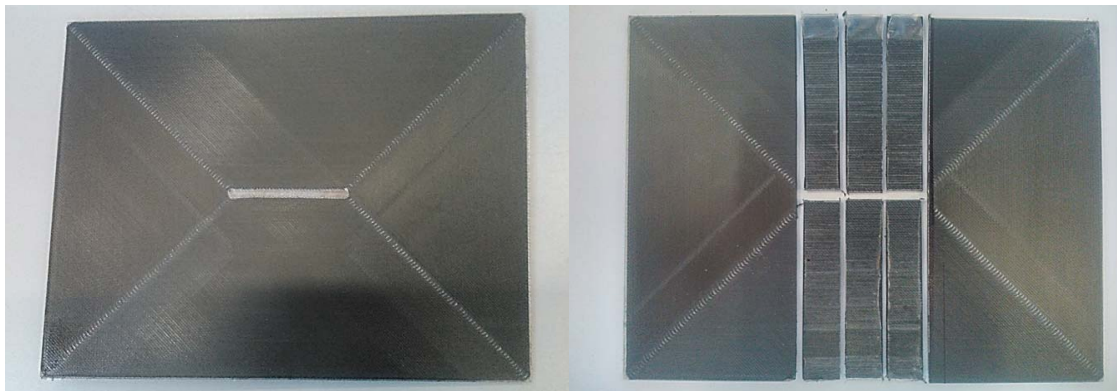


**Figura 2.23** Geometría panel.



**Figura 2.24** Panel con tensiones residuales.

Una vez extraído el panel de la cama de impresión y al enfriarse, aparecieron tensiones residuales que hicieron que los extremos del panel no se encontraran todos en el mismo plano (figura 2.24). Sin embargo, las tensiones residuales acabaron desapareciendo y al mecanizarlo para obtener la probetas estaba totalmente plano.



**Figura 2.25** Antes y después de preparar el panel.

En la figura 2.25 se puede observar la zona útil de la que se extrajeron las probetas y la que no se puede aprovechar. En la impresora Mark Two® han mejorado la impresión de fibra y se pueden utilizar otros patrones de relleno, de forma que ya no es necesario fabricar un panel del que obtener las probetas, se pueden imprimir las probetas directamente con la fibra en la dirección deseada.

Puesto que las probetas así obtenidas se van a ensayar a compresión y las dimensiones están marcadas por el útil que se va a emplear, es necesario que el largo de éstas sea de 80mm. Esta longitud no se puede conseguir con la impresión de las probetas por lo que fue necesario incorporar a las probetas unos suplementos para completar la longitud y poder realizar con éxito los ensayos.

### 2.3.3 Ensayos y aplicaciones

Las normas seguidas para el ensayo de compresión de la fibra de carbono son ASTM D-6641 [7], UNE-EN ISO 14126 [6] y I+D-E 51 [5] que recogen la geometría y condiciones del ensayo además del tratamiento de los resultados obtenidos.

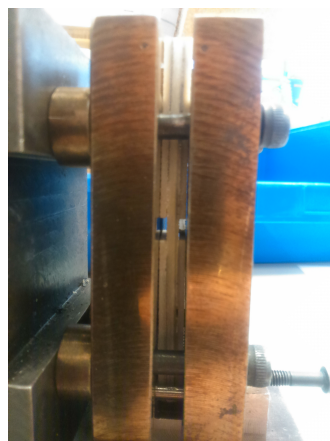
Cabe destacar que el problema fundamental del ensayo de compresión es evitar los fenómenos de pandeo global del espécimen. Por esto, tanto los útiles de ensayo, como la geometría de las probetas están diseñados para evitar estos fenómenos.

En el ensayo de compresión, cuando la dirección de las fibras coincide con la dirección longitudinal de la probeta y a partir de la tensión última soportada por el espécimen se puede obtener el valor de la resistencia a compresión en la dirección de las fibras  $X_c$ . En el caso, que las fibras estén dispuestas en la dirección transversal a las fibras se determinará  $Y_c$ .

Se ha utilizado la máquina de ensayos *Instron 4483* con una célula de carga de 150kN.



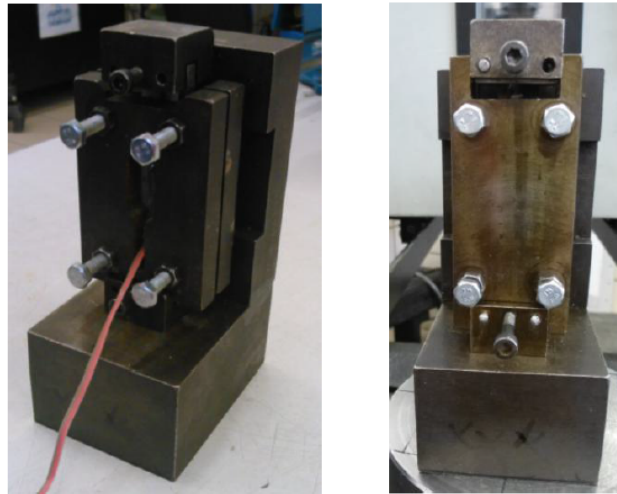
**Figura 2.26** Máquina de ensayos *Instron 4482*.



**Figura 2.27** Guías del útil.

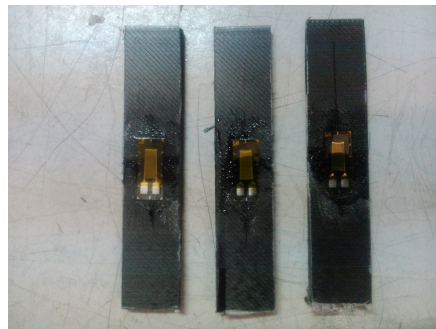
La probeta se coloca entre unas guías que evitan la flexión fuera del plano de la probeta [figura 2.27](#). Al utilizar bandas extensométricas en el ensayo, el útil presenta un orificio

central donde se sitúa la banda y a través del que se pasan los cables para conectarlos a la caja de bandas. Al ensayar las probetas hasta rotura, el útil no cuenta con orificio central.



**Figura 2.28** Diferencia del útil al utilizar bandas extensométricas.

Para medir las deformaciones de las probetas se han utilizado bandas extensométricas LY41-6/120 (figura 2.29) que permiten medir la deformación longitudinal. Durante el ensayo se conectaron a una caja de bandas que cuenta en el interior con un puente Wheatstone.



**Figura 2.29** Bandas extensométricas.

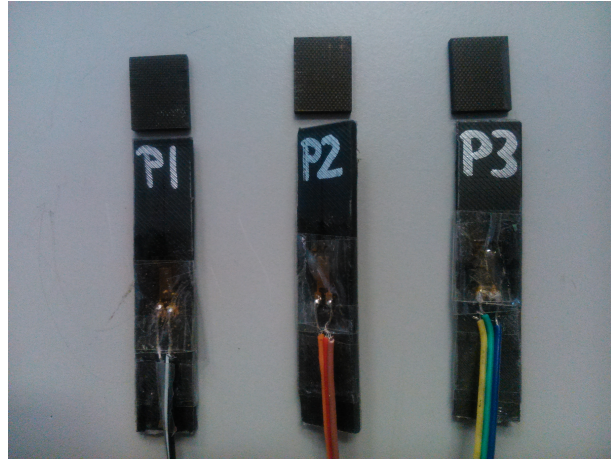
Debido a la complejidad de la obtención de las probetas de fibra de carbono únicamente se pudieron obtener seis, de las cuales se decidió utilizar tres para obtener el módulo  $E_{22}$  y otras tres para obtener la resistencia a la compresión  $Y_c$ .

### Preparación de las probetas

Fue necesario incluir a las probetas un suplemento para completar la longitud necesaria para realizar el ensayo satisfactoriamente, tanto a las utilizadas en la determinación de la rigidez como a las empleadas para determinar la resistencia.

Las empleadas para determinar características de rigidez no necesitan tacones y únicamente fue necesario completarles la longitud hasta 80mm (figura 2.30). Para la fabricación del suplemento se empleó un panel de fibra de carbono unidireccional de igual espesor que las probetas. La dirección de la fibra del suplemento es de  $0^\circ$  para que no afecte a los resultados del ensayo. Utilizando unos suplementos con la dirección paralela a la de

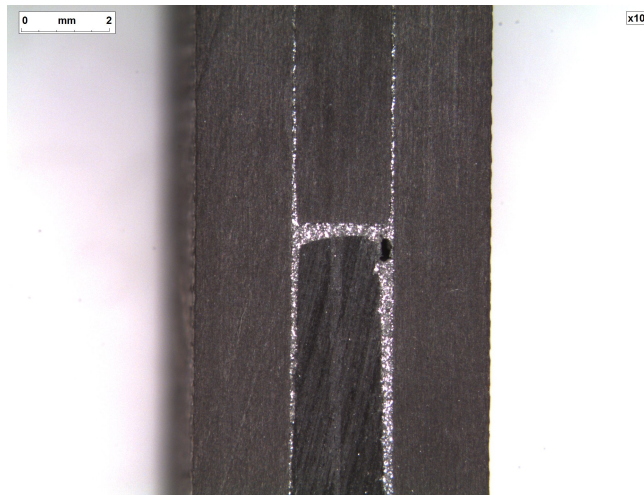




**Figura 2.30** Suplemento en las probetas de módulo.

aplicación de la carga se evita la influencia del suplemento en los resultados del ensayo. Al ensayo que podría afectar es al de determinación de la resistencia a compresión, sin embargo, las probetas impresas romperán antes de que el suplemento pueda afectar al ensayo por estar la fibra a  $90^\circ$ . En el ensayo de determinación de la rigidez no va afectar la inclusión del suplemento.

Las probetas de fibra de carbono ensayadas para determinar la resistencia a compresión incorporan, además del suplemento, tacones. En este caso, se completó la longitud hasta 100mm y se fabricaron tacones con el mismo material del suplemento. La razón de completar hasta 100mm fue para posteriormente a la adhesión de los tacones, acondicionar las probetas de una forma más sencilla que permita mantener los ángulos.

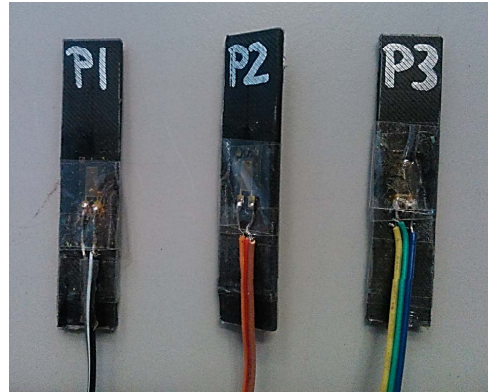


**Figura 2.31** Interfase del suplemento con la probeta impresa.

En la [figura 2.31](#) se puede observar la zona en la que el suplemento se ha adherido a la probeta impresa. El material de la parte inferior corresponde a la probeta impresa y el suplemento se puede apreciar en la superior. En los laterales están los tacones, del mismo material que el suplemento.

### Fibra de carbono - Obtención de $E_{22}$ a compresión

Las tres probetas utilizadas en este ensayo incorporan bandas extensométricas y no se ensayan hasta rotura ([figura 2.32](#)). Las dimensiones se recogen en la [tabla 2.10](#).



**Figura 2.32** Probetas para obtener  $E_{22}$ .

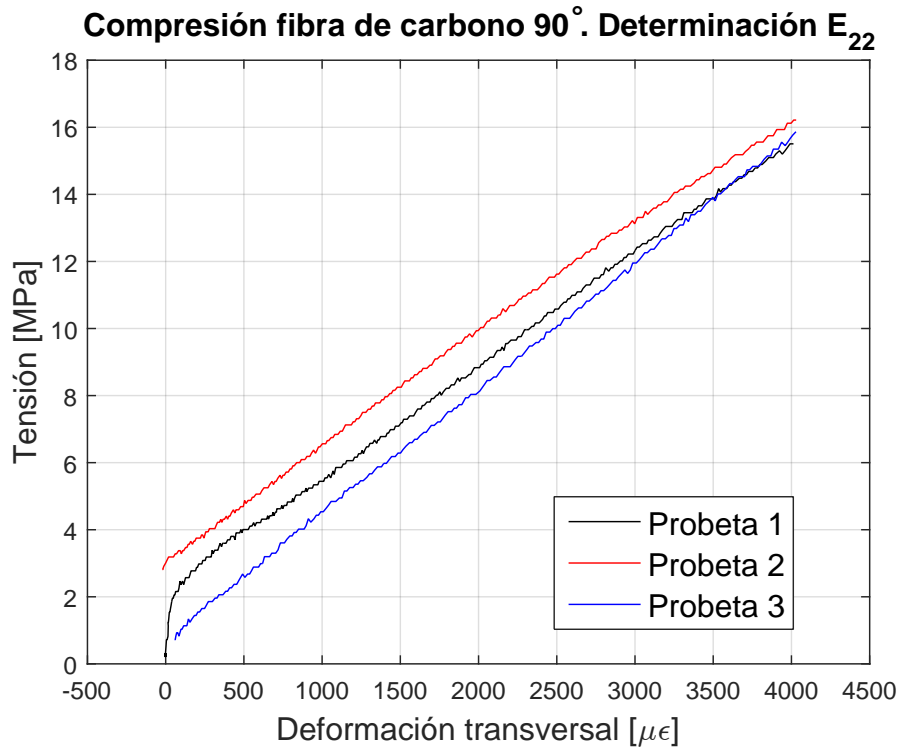
**Tabla 2.10** Dimensiones probetas fibra de carbono  $90^\circ$  para  $E_{22}$ .

Probeta	Ancho [mm]	Espesor total [mm]	Espesor sin capas [mm]
P1	12.836	2.248	1.998
P2	13.562	2.322	2.072
P3	13.164	2.192	1.942

El valor del módulo elástico de compresión de cada probeta se ha calculado entre  $500\mu\epsilon$  y  $2500\mu\epsilon$  según la norma UNE-EN ISO 14126 [6], obteniendo los resultados mostrados en la [tabla 2.11](#).

**Tabla 2.11** Resultado experimentales  $E_{22}$  -Fibra de carbono.

Probeta	$E_{22}$ [GPa]	$E_{22}$ [GPa] sin capas exteriores
P1	2.93	3.29
P2	3.02	3.36
P3	3.26	3.73
Media	3.07	3.46
Desviación típica	0.17	0.24
Coefficiente de variación (%)	5.56	6.83

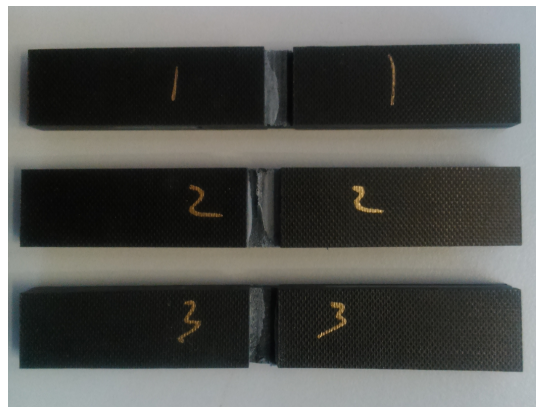


**Figura 2.33** Resultados experimentales fibra de carbono 90° -  $E_{22}$ .

Como se observa en la [figura 2.33](#), la pendiente de todos los ensayos es muy similar, siendo prácticamente paralelas en algunos tramos.

#### Fibra de carbono - Obtención de $Y_c$

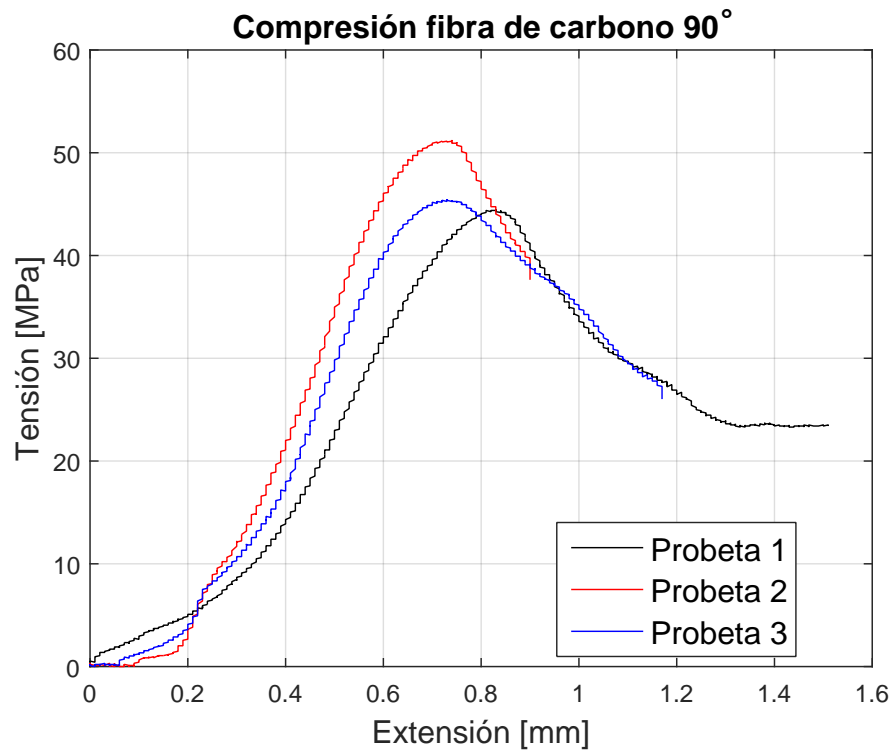
En este caso, las probetas incorporan tacones y se ensayan hasta rotura ([figura 2.34](#)). Las dimensiones se recogen en la [tabla 2.12](#).



**Figura 2.34** Probetas para obtener  $Y_c$ .

**Tabla 2.12** Dimensiones probetas fibra de carbono 90° para  $Y_c$ .

Probeta	Ancho [mm]	Espesor total [mm]	Espesor sin capas [mm]
P1	12.558	2.230	1.980
P2	12.562	2.222	1.972
P3	12.660	2.272	2.022

**Figura 2.35** Resultados experimentales fibra de carbono 90° -  $Y_c$ .**Tabla 2.13** Resultado experimentales  $Y_c$  - Fibra de carbono.

Probeta	$Y_c$ [MPa]	$Y_c$ [MPa] sin capas exteriores
P1	39.51	44.50
P2	45.48	51.24
P3	40.48	45.49
<b>Media</b>	41.82	47.07
<b>Desviación típica</b>	3.20	3.64
<b>Coefficiente de variación (%)</b>	7.66	7.73

En la [figura 2.35](#) se puede observar que la tendencia de las curvas es similar. Existe un primer tramo más horizontal que indica la parte del ensayo en el que la probeta comienza a



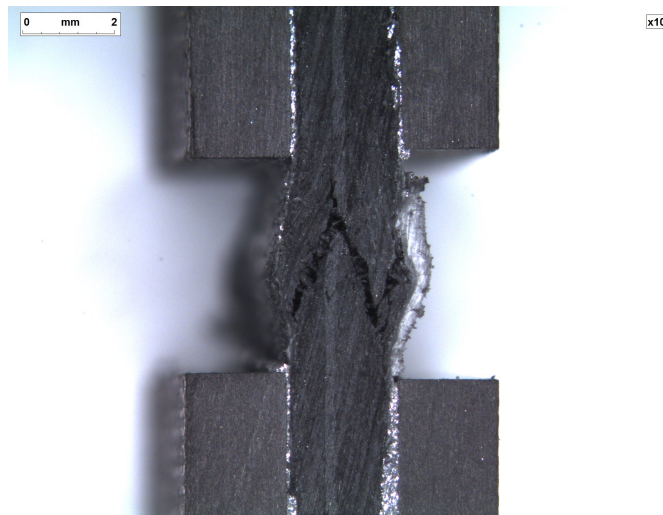
soportar la carga. Después de esto, la carga comienza a aumentar hasta alcanzar su valor máximo. Tras alcanzar la carga su máximo, la probeta deja de soportar carga, indicando esto, que se ha producido el fallo. Los resultados obtenidos se recogen en la [tabla 2.13](#).



**Figura 2.36** Roturas a compresión probetas fibra de carbono a 90° con tacones.

En la [figura 2.36](#) se pueden observar los distintos modos de rotura de las probetas ensayadas a compresión. De acuerdo a las normas ASTM D6641 [7] y UNE-EN ISO 14126 [6], los modos de rotura dados son aceptables. La rotura de la probeta 1 es del tipo *cizallamiento a través del espesor*, de la probeta 2 del tipo *separación* y de la probeta 3 del tipo *compleja*.

El detalle de la rotura compleja encontrada en la probeta 3 se muestra en la [figura 2.37](#). Se puede observar una línea central que recorre la probeta longitudinalmente provocada por la pausa en la fabricación del panel de fibra de carbono. Dicha pausa hace que el material ya depositado se enfríe, volviendo a aumentar su temperatura al reanudar la impresión.

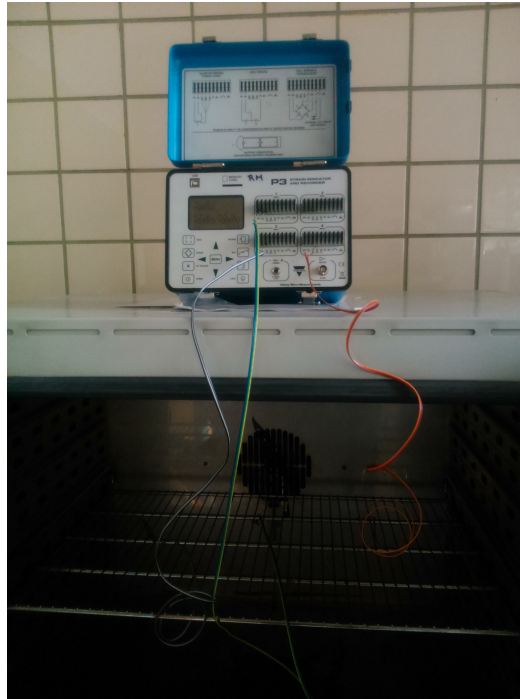


**Figura 2.37** Detalle de rotura *compleja* en la probeta 3.

### Obtención del coeficiente de dilatación térmica de la fibra de carbono

Tras ensayar las probetas de fibra de carbono a 90° a compresión para obtener el módulo elástico  $E_{22}$ , se sometieron a temperatura en un horno para calcular el coeficiente de dilatación térmica.

El montaje fue el mostrado en la [figura 2.38](#).



**Figura 2.38** Montaje para el cálculo del coeficiente de dilatación térmica.

Se quiso medir las microdeformaciones para distintas temperaturas introduciendo en el horno las tres probetas a la vez para así poder detectar potenciales problemas. Únicamente se consiguió medirlas para 40°C ya que al aumentar la temperatura las galgas empezaron a registrar medidas erróneas y distintas en cada probeta. Por lo tanto, considerando  $T_{ref}=25^{\circ}\text{C}$ , se obtuvo:

**Tabla 2.14** Resultados del ensayo térmico.

Probeta	1	2	3
$\mu\epsilon$	638	695	704
$\alpha_2 [^{\circ}\text{C}^{-1}]$	$42.53 \cdot 10^{-6}$	$46.33 \cdot 10^{-6}$	$46.93 \cdot 10^{-6}$

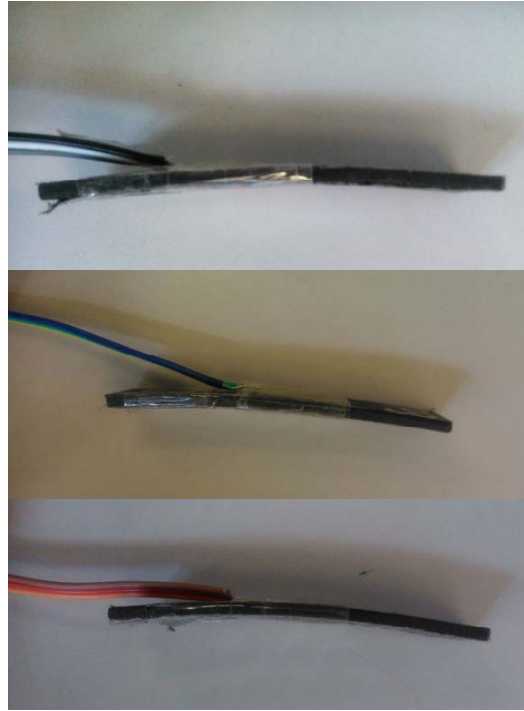
con:

- Media:  $45.26 \cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$
- Desviación típica:  $23.86 \cdot 10^{-6}$
- Coeficiente de variación (%): 5.27

Las probetas quedaron como muestra la [figura 2.39](#), por efecto de la temperatura.

### 2.3.4 Tiempos de diseño y fabricación

El tiempo empleado en el diseño del panel es despreciable. Aunque el tiempo que la máquina estuvo imprimiendo fue el que se recoge en la columna *Tiempo Mark One®*, es



**Figura 2.39** Estado final de las probetas.

necesario destacar que en obtener la pieza se tardó bastante más. Hubo que vigilar durante todo el tiempo de impresión el carrete, ya que si no estaba lo suficientemente tensa la fibra, ésta podía salirse del carrete, romperse y hacer fallar la impresión.

Durante la impresión hubo que cambiar el carrete de fibra puesto que no había material suficiente para completar la impresión. Por lo tanto, habría que considerar en el tiempo total al menos, el empleado en un cambio de carrete sin dificultades añadidas, estimado en 7min.

**Tabla 2.15** Tiempos empleados en el diseño y fabricación de la pieza 3.

Catia®	Tiempo Eiger®	Tiempo Mark One®	Total
1min	17h 47min	9h 41min	9h 42min

## 2.4 Pieza 4: Probetas de nylon

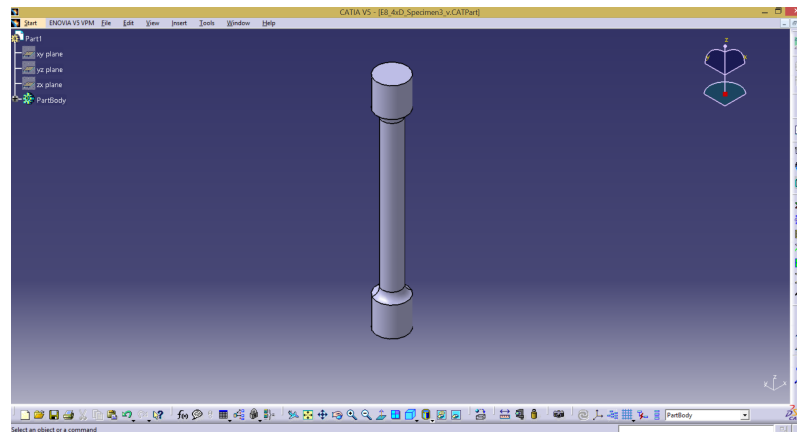
Se han impreso probetas de nylon según ASTM E8-E8M [8] para comprobar si las propiedades en la dirección de impresión varían respecto a las propiedades en el plano.

Inicialmente se decidió imprimir la geometría que dicta la norma, pero durante la impresión un fallo hizo que la geometría no se completara y se decidió cambiarla.

Ensayando a tracción las probetas se pretende observar la diferencia en el valor del módulo elástico entre probetas en las que la dirección de la carga es paralela al plano de impresión y probetas en las que la carga se aplica perpendicular a dicho plano.

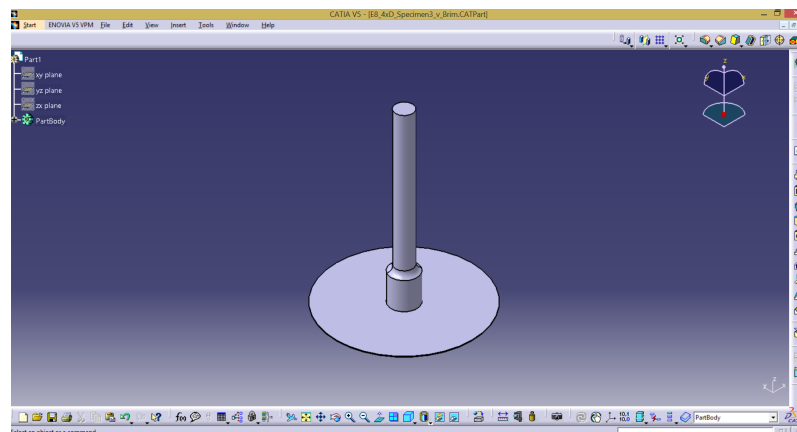
### 2.4.1 Diseño en el software Catia®

La geometría de estas probetas se recoge en la norma ASTM E8-E8M [8] y se muestra en la [figura 2.40](#).



**Figura 2.40** Probeta para ensayo de tracción.

Tras el fallo en la impresión se decidió imprimir la geometría de la [figura 2.41](#). Utilizando esta última geometría no es necesario que el software incorpore soportes en el cuerpo de la probeta, ya que la base es mayor que la parte superior. La inclusión de soportes perjudica el acabado superficial de las probetas al extraerlos. Si bien no es complicada su extracción, siempre permanecen restos en la pieza.



**Figura 2.41** Geometría final para el ensayo de tracción.

Para evitar el despegue de la pieza y el posterior fallo de la impresión, se incorporó a las probetas una zona alrededor de ésta en contacto con la cama de impresión que hace la función del *Brim* que se puede incorporar desde el software Eiger<sup>®</sup>, pero al diseñarlo desde Catia<sup>®</sup> las dimensiones se adaptan a la pieza.

Tras arrojar el ensayo de la geometría mostrada en la [figura 2.41](#) resultados satisfactorios, se decidió imprimir todas las probetas iguales.

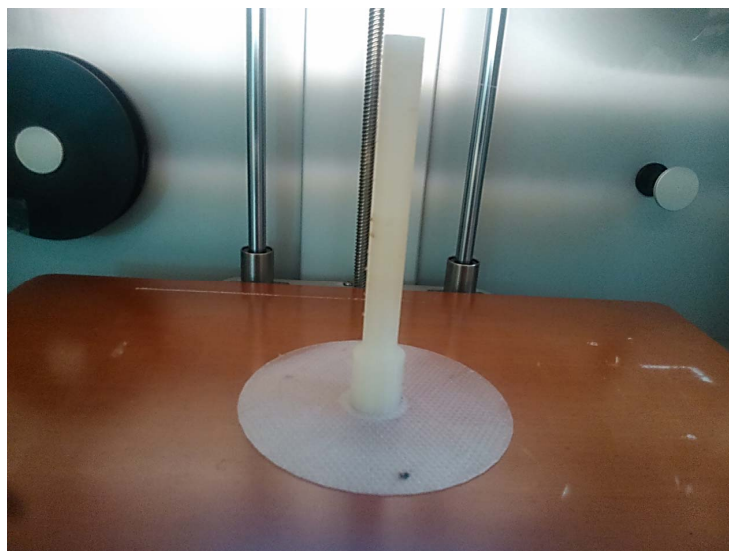
#### 2.4.2 Fabricación con la impresora Mark One<sup>®</sup>

En la [figura 2.42](#) se observa la geometría que se cargó a la impresora en un primer momento y antes del fallo. La parte central corresponde al cuerpo de la probeta, mientras que las ondulaciones exteriores corresponden a los soportes que incorpora de forma automática el software Eiger<sup>®</sup>.



**Figura 2.42** Probeta con soportes.

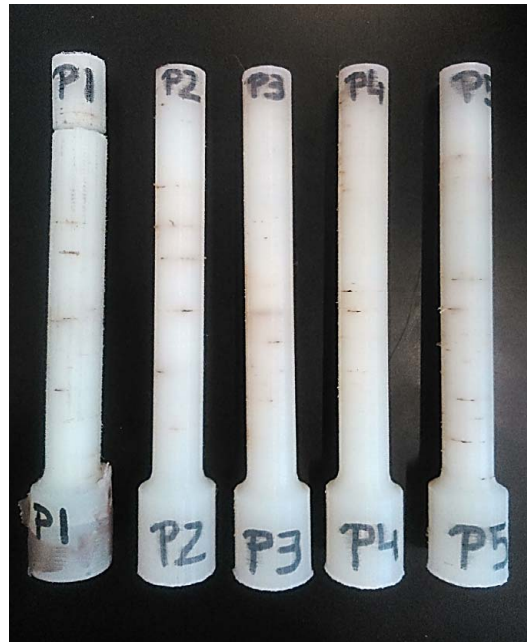
La geometría que finalmente se ensayó se muestra en la [figura 2.43](#).



**Figura 2.43** Geometría conseguida.

El *Brim* incorporado de forma manual desde Catia<sup>®</sup> está fabricado en nylon con mallado





**Figura 2.44** Probetas de nylon para ensayo de tracción.

triangular con una densidad del 100 %. La densidad del mallado viene dada por la densidad que se requiere para la probeta, ya que no se puede cambiar capa a capa. Se decidió utilizar mallado triangular al *Brim* para así ahorrar material y tiempo de impresión. Utilizar un mallado que confiera menor rigidez a la zona de la pieza en contacto con la cama de impresión facilita la adhesión entre la pieza y la cama.



**Figura 2.45** Detalle del mallado triangular.

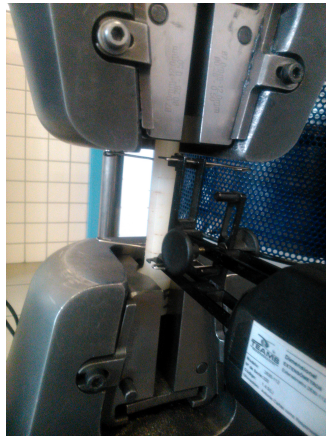
En la [figura 2.45](#) se observa el *Brim* diseñado desde Catia<sup>®</sup> ya fabricado. Se aprecia como en los alrededores de la probeta el *Brim* se torna más opaco. Esto indica que en esa zona el nylon no está adherido a la cama de impresión. La causa de esta separación es que el cuerpo de la probeta es muy pequeño en relación a su altura. Cuando el cabezal deposita el nylon en las últimas capas, ejerce una fuerza sobre la pieza que hace que en la zona inferior

se separe de la cama de impresión.

Comparando el *Brim* incorporado por el software (figura 2.42) con el incorporado manualmente (figura 2.43) y visto lo anterior, se puede extraer que la incorporación del *Brim* de forma manual facilitó la impresión de esta geometría y que no se produjera error alguno durante la impresión. Las dimensiones del *Brim* original son demasiado pequeñas como para evitar la separación de la pieza de la cama de impresión cuando se deposita el material en las últimas capas.

### 2.4.3 Ensayos y aplicaciones

Para este ensayo de tracción la geometría de las probetas, el procedimiento o técnica experimental, resultados y recomendaciones que se han seguido se recogen en la norma ASTM E8-E8M [8]. Se utilizó la máquina de ensayos *Instron 4482* con una célula de carga de 100kN y un extensómetro de longitud calibrada 50mm (figura 2.46).



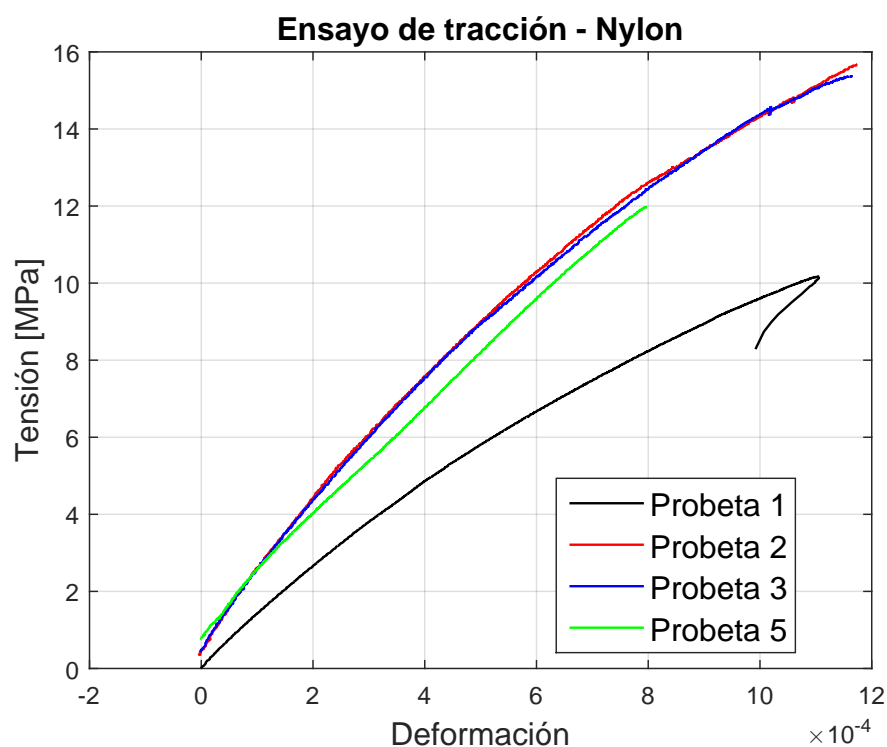
**Figura 2.46** Extensómetro para probetas redondas.

Con este ensayo se quiso observar la capacidad resistente del nylon en la dirección de impresión. Cuando se trabaja con materiales compuestos, las propiedades en el espesor no son las mismas que en el plano, por la particularidad de la impresión 3D se quiere comprobar qué ocurre en este caso.

Las dimensiones de las probetas obtenidas se muestran en tabla 2.16.

**Tabla 2.16** Dimensiones de las probetas de nylon.

Probeta	P1	P2	P3	P4	P5
<b>Diámetro [mm]</b>	12.75	12.16	12.02	12.04	12.11



**Figura 2.47** Resultados obtenidos ensayo tracción nylon.

En la [figura 2.47](#) se recogen los resultados obtenidos al ensayar las probetas. Los obtenidos para la probeta 4 se han omitido ya que durante la colocación de la probeta en la mordaza y debido a la fragilidad del material, al apretar la mordaza se partió la probeta. Sin embargo, se conservó longitud suficiente para ensayar hasta rotura aunque no se pudiese incorporar el extensómetro. Al ensayar a carga última, la probeta 4 resultó soportar 11MPa de tensión.

La velocidad del ensayo se estableció en 0.5mm/min para las probetas 2, 3 y 5 y en 0.6mm/min para la probeta 1. Teniendo en cuenta la velocidad del ensayo y la tendencia de las curvas, se puede extraer que los resultados van a variar en función de la velocidad a la que se realice el ensayo.

**Tabla 2.17** Resultados experimentales módulo elástico - Nylon.

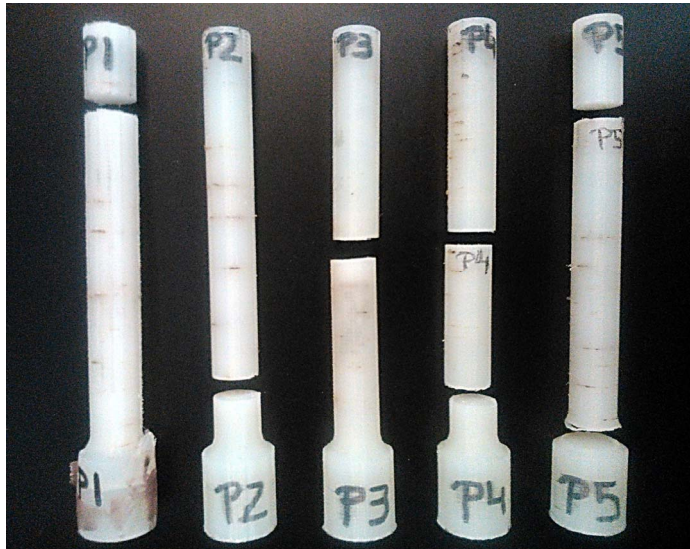
Probeta	E [MPa]
P2	337.28
P3	320.91
P5	348.78
Media	335.66
Desviación típica	14.00
Coefficiente de variación (%)	4.17

El módulo elástico se ha medido en el primer tramo lineal de cada curva obteniéndose



los resultados recogidos en la [tabla 2.17](#). Se han realizado los cálculos de las propiedades con las probetas cuyo ensayo se desarrolló a 0.5mm/min, por lo que los resultados de la probeta 1 se han omitido.

Puesto que el resultado obtenido en [21] para el módulo elástico con una densidad de mallado del 100 % es de 385.97MPa, se puede concluir que la merma en las propiedades en la dirección de impresión está en el entorno del 13.03 %.



**Figura 2.48** Probetas de nylon ensayadas.

En la [figura 2.48](#) se muestran las probetas ya ensayadas hasta rotura. En la probeta 4, comenzando desde la base, la segunda rotura corresponde a la que se produjo de forma accidental al colocar la probeta en la máquina de ensayos. Se puede observar que la longitud resultante no es suficiente para la incorporación del extensómetro.

Para comprobar la diferencia en las propiedades en la impresión con fibra sería necesario obtener probetas de geometría similar a la utilizada para el nylon, pero la rigidez de la fibra no permite que la impresora coloque fibra en un diámetro tan reducido.

Con respecto a la resistencia a la tracción, los resultados obtenidos se recogen en la [tabla 2.18](#)

**Tabla 2.18** Resultados experimentales tensión última - Nylon.

Probeta	Tensión última [MPa]
P2	15.68
P3	15.39
P4	11.00
P5	11.97
<b>Media</b>	13.51
<b>Desviación típica</b>	2.37
<b>Coefficiente de variación (%)</b>	17.56

#### 2.4.4 Tiempos de diseño y fabricación

El tiempo empleado en el diseño esta vez es más elevado ya que la geometría es más compleja que las diseñadas hasta ahora.

Los tiempos indicados por la máquina en la impresión de todas las probetas fueron los mismos.

**Tabla 2.19** Tiempos empleados en el diseño y fabricación de la pieza 4.

<b>Catia®</b>	<b>Tiempo Eiger®</b>	<b>Tiempo Mark One®</b>	<b>Total</b>
20min	4h 41min	4h 35min	4h 55min

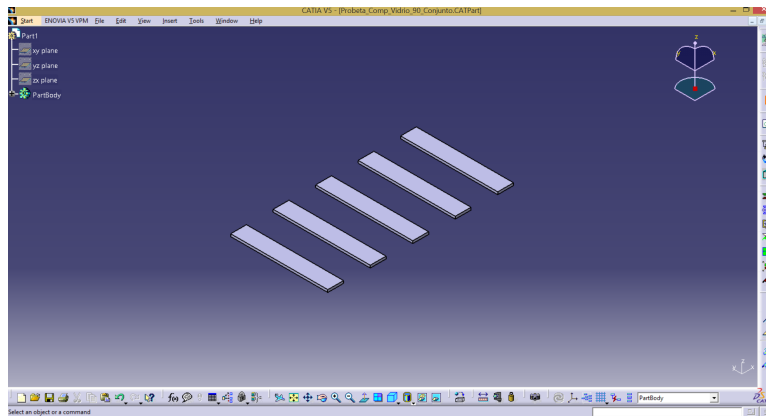
## 2.5 Pieza 5: Probetas de fibra de vidrio

Para completar la caracterización de la fibra de vidrio se van a realizar ensayos a compresión.

Se han ensayado probetas con fibra a  $0^\circ$  para obtener la resistencia a la compresión en la dirección de las fibras ( $X_c$ ) y con la fibra a  $90^\circ$  para obtener la resistencia a compresión en la dirección transversal a las fibras ( $Y_c$ ).

### 2.5.1 Diseño en el software Catia®

En este caso, no ha sido necesario diseñar una geometría de la que obtener las probetas, ya que se puede imprimir fibra de vidrio con la dirección deseada.



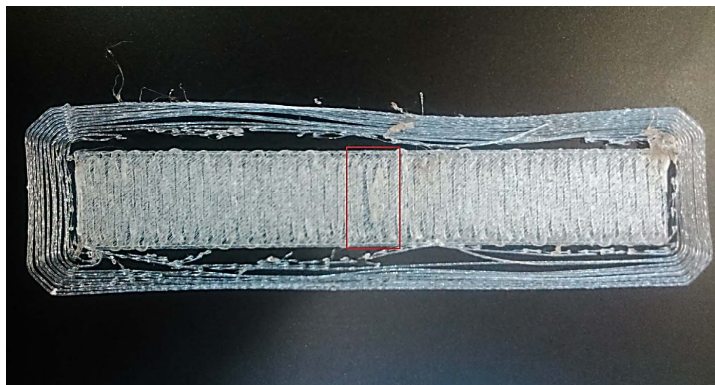
**Figura 2.49** Probetas para fabricar de fibra de vidrio.

Inicialmente se pensó en imprimir las probetas todas juntas (figura 2.49), pero finalmente se optó por imprimirlas separadas y observar si la deposición de material era correcta.

La dificultad en el acondicionamiento de las probetas para ensayarlas, hizo que se diseñara un panel de dimensiones 270x110x2mm del que posteriormente se extraerían las probetas con la orientación deseada.

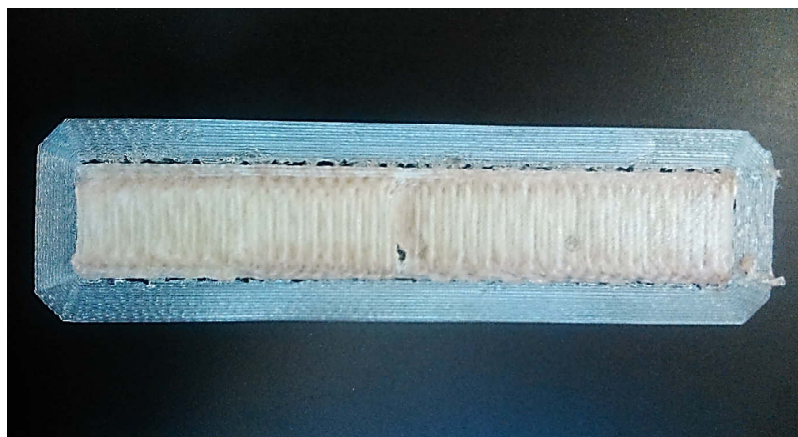
### 2.5.2 Fabricación con la impresora Mark One®

Durante la impresión de las probetas se observó que en la zona central de éstas aparecía un fallo en la colocación de la fibra (figura 2.50).



**Figura 2.50** Fallo durante la impresión.

Supervisando la impresión, se observó que el fallo se producía en el momento en el que la extrusora cortaba la fibra. Durante el corte, el cabezal de impresión se desplaza ligeramente sin depositar fibra, lo que provoca que cuando la vuelve a depositar la alineación no sea la adecuada. En la [figura 2.51](#) se puede observar claramente como el leve movimiento del cabezal se repite durante la impresión de cada una de las capas, por lo que al completar la impresión de la probeta se observa que ésta presenta un pequeño orificio en la parte central.



**Figura 2.51** Probeta con orificio.

Se optó por cambiar la orientación de la probeta en la cama. Anteriormente estaba colocada a lo ancho de la cama de impresión y se giró  $90^\circ$ .

Tras comprobar que ocurría en todas las configuraciones se decidió imprimir una probeta de un tamaño mayor y a partir de ésta obtener posteriormente probetas del tamaño adecuado. Cabe mencionar, que en el diseño de la probeta de tamaño mayor se tuvo en cuenta que hay una longitud igual a la que se va a imprimir posteriormente al corte de la fibra que se desechará por presentar el fallo visto anteriormente.

En la [figura 2.51](#) se puede observar la inclusión de *Brim* en la impresión para que la probeta no se despegue de la cama de impresión.



**Figura 2.52** Panel de fibra de vidrio.

Puesto que el pegado de los tacones sobre probetas de dimensiones tan reducidas es complicado, se decidió imprimir un panel con fibra en una misma dirección y a partir de

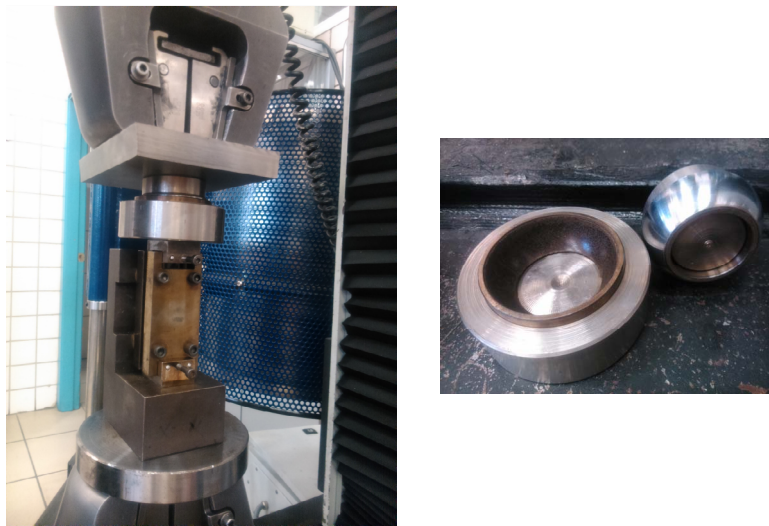
éste obtener las probetas necesarias para realizar ensayos con la fibra a  $0^\circ$  y a  $90^\circ$ . Las dimensiones del panel fueron 270x110x2mm (figura 2.52).

### 2.5.3 Ensayos y aplicaciones

Para los ensayos de compresión de las probetas de fibra de vidrio se han seguido las normas ASTM D-6641 [7], UNE-EN ISO 14126 [6] y I+D-E 51 [5].

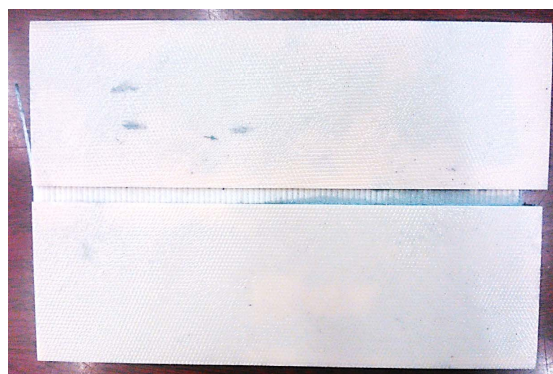
Se ha utilizado la máquina de ensayos *Instron 4483* con una célula de carga de 150kN. En este caso el útil de compresión empleado no presentaba el orificio central, puesto que las probetas no requerían bandas extensométricas.

Durante el ensayo de compresión de fibra de vidrio se utilizó un dispositivo para distribuir la carga sobre las probetas de manera uniforme puesto que se aplicó la carga desde la mordaza y no con la prensa por no disponer de ella en el momento en el que se debía desarrollar el ensayo (figura 2.53).



**Figura 2.53** Dispositivo utilizado para distribuir la carga uniformemente.

### Preparación de las probetas

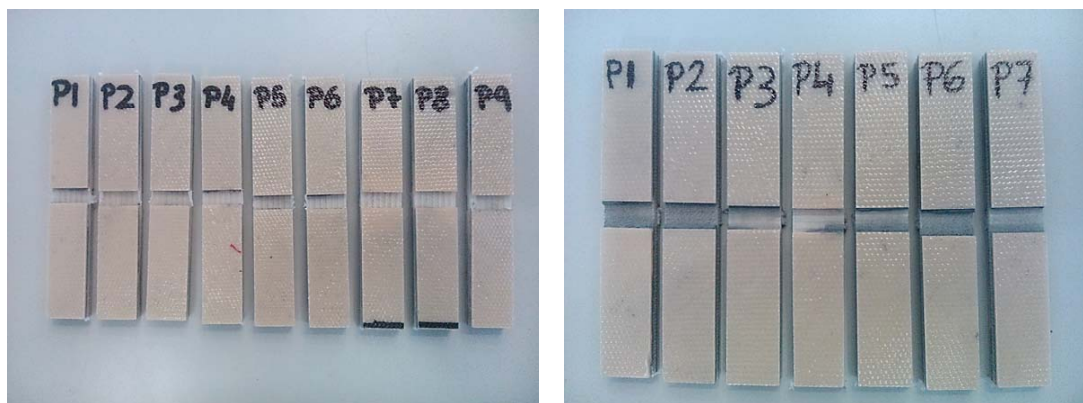


**Figura 2.54** Panel de fibra de vidrio a  $0^\circ$  con tacones.



Para la correcta realización del ensayo ha sido necesario incorporar tacones obtenidos de un panel de tejido de fibra de vidrio curado en autoclave.

Una vez cortados los tacones con las medidas necesarias hay que adherirlos a las probetas. Para ello se emplea el adhesivo EA-9394 de dos componentes, siendo las proporciones para el primer componente (Part A) y para el segundo componente (Part B) 100 y 17 respectivamente.



**Figura 2.55** Probetas de fibra de vidrio.

El proceso de pegado ha consistido en mantener durante veinticuatro horas bajo presión y a temperatura ambiente el material con los tacones pegados y posteriormente curar el adhesivo en un horno sometiéndolo a 66°C durante al menos hora y media. Se decidió mantener el material durante dos horas para así asegurar el correcto curado del adhesivo.

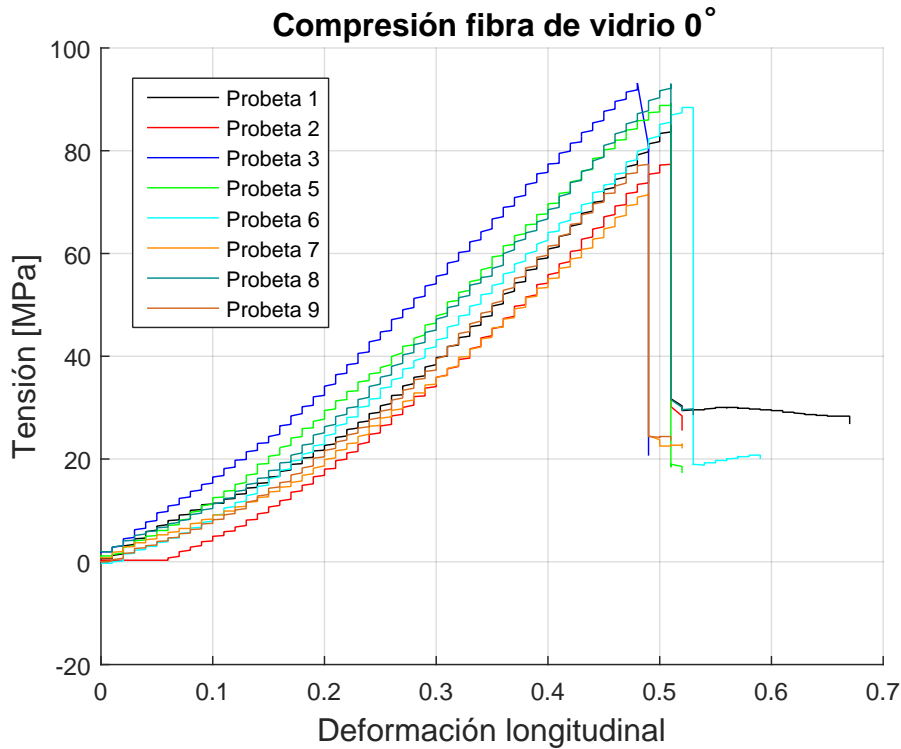
Una vez que el adhesivo ya ha curado se procede a la mecanización de las probetas ([figura 2.55](#)).

#### **Fibra de vidrio a 0°**

Para obtener  $X_c$  se ensayaron nueve probetas cuyas dimensiones se recogen en la [tabla 2.20](#).

**Tabla 2.20** Dimensiones probetas fibra de vidrio 0°.

Probeta	Ancho [mm]	Espesor total [mm]	Espesor sin capas [mm]
P1	12.592	2.237	2.037
P2	12.768	2.260	2.060
P3	12.620	2.307	2.107
P4	12.750	2.247	2.047
P5	12.544	2.423	2.223
P6	12.616	2.297	2.797
P7	12.572	2.237	2.037
P8	12.616	2.283	2.083
P9	12.740	2.477	2.277



**Figura 2.56** Resultados experimentales fibra de vidrio 0°.

Se representa en la [figura 2.56](#) la tensión frente a la deformación longitudinal de las probetas ensayadas satisfactoriamente, apreciándose que la tendencia de todas las curvas es similar y la rotura se produce en un intervalo reducido de deformación aunque la carga que soportan difiere algo más.

Los resultados obtenidos para la resistencia  $X_c$  se recogen en [tabla 2.21](#)

**Tabla 2.21** Resultado experimentales  $X_c$  - Fibra de vidrio.

Probeta	$X_c$ [MPa]	$X_c$ [MPa] sin capas exteriores
P1	77.43	85.03
P2	71.33	78.25
P3	85.09	93.17
P5	81.87	89.24
P6	80.72	88.42
P7	65.34	71.76
P8	84.90	93.05
P9	71.10	77.35
<b>Media</b>	77.22	84.53
<b>Desviación típica</b>	7.25	7.92
<b>Coeficiente de variación (%)</b>	9.39	9.36

Destacar que en la probeta 4 se produjo un aplastamiento inusual lo que provocó una rotura no admisible. Esto ha hecho que su ensayo arrojara resultados que difieren de los obtenidos en el resto de ensayos, por lo que se han omitido en el cálculo de las propiedades. La rotura de las probetas se puede observar en la [figura 2.57](#). Para validar los resultados



**Figura 2.57** Roturas a compresión probetas fibra de vidrio a  $0^\circ$ .

se observa la forma de rotura de las probetas:

- Cizallamiento a través del espesor: Probetas 1, 7, 8 y 9.
- Separación: Probeta 3.
- Delaminación: Probeta 6.
- Separación + Delaminación: probetas 2 y 5.

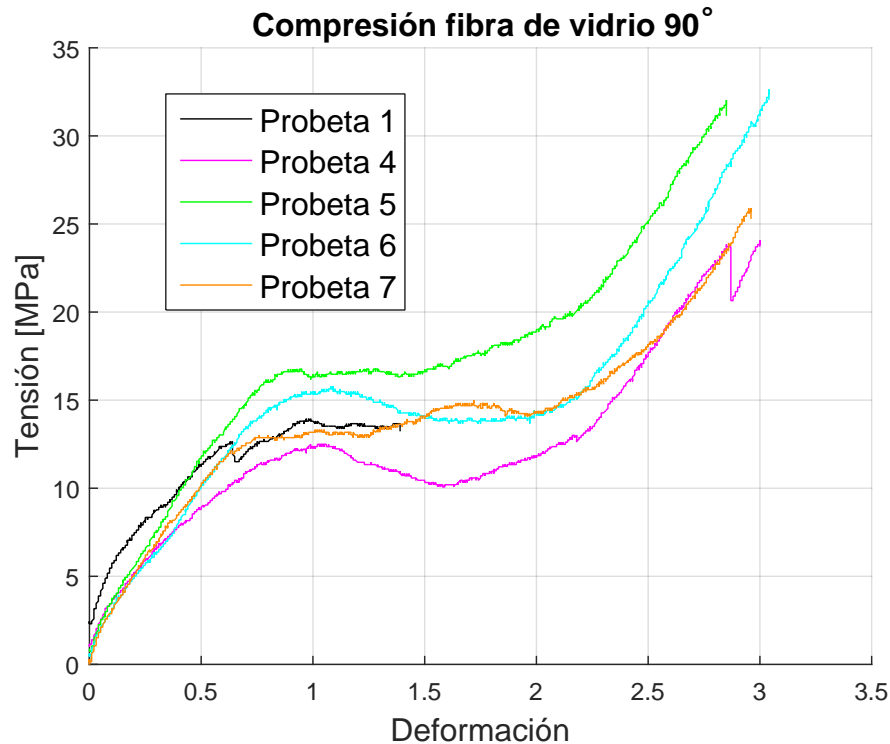
#### **Fibra de vidrio a $90^\circ$**

En este caso se han ensayado siete probetas cuyas dimensiones se recogen en [tabla 2.22](#).

**Tabla 2.22** Dimensiones probetas fibra de vidrio  $90^\circ$ .

<b>Probeta</b>	<b>Ancho [mm]</b>	<b>Espesor total [mm]</b>	<b>Espesor sin capas [mm]</b>
P1	12.336	2.427	2.2267
P2	12.610	2.307	2.107
P3	12.736	2.330	2.130
P4	12.448	2.690	2.490
P5	12.646	2.287	2.087
P6	12.450	2.290	2.090
P7	12.562	2.277	2.077





**Figura 2.58** Resultados experimentales fibra de vidrio 90°.

En la [figura 2.58](#) se representa la tensión frente a la deformación longitudinal. El ensayo se paró cuando la probeta dejó de soportar carga. En este caso es menos evidente que en el caso del ensayo a compresión con la fibra a 0°, sin embargo, se identificó un punto en el que la carga dejaba de aumentar, que fue cuando se detuvo el ensayo.

**Tabla 2.23** Resultado experimentales  $Y_c$  - Fibra de vidrio.

Probeta	$Y_c$ [MPa]	$Y_c$ [MPa] sin capas exteriores
P1	12.80	13.95
P4	22.30	24.09
P5	29.24	32.04
P6	29.79	32.64
P7	23.62	25.89
<b>Media</b>	26.24	28.67
<b>Desviación típica</b>	3.83	4.31
<b>Coeficiente de variación (%)</b>	14.59	15.05

Como criterio conservador se podría considerar que la probeta no aguanta más carga que la soportada cuando la deformación alcanza 1mm, pero puede continuarse el ensayo hasta valores superiores de carga. Aún así, hay que tener en cuenta que valores de deformación por encima de los 3mm comprometen la aplicación de la carga. Es decir, con un valor de deformación por encima de 3mm puede ocurrir que la carga la comience a soportar el útil

en vez de la probeta.

Teniendo en cuenta todo esto, se obtienen los valores recogidos en la [tabla 2.23](#) para la resistencia  $Y_c$ .

Las probetas 2 y 3 no fueron ensayadas adecuadamente arrojando resultados incorrectos, por lo que no se utilizan para calcular el valor de  $Y_c$ .



**Figura 2.59** Modo de fallo a compresión en probetas fibra de vidrio a 90°.

El modo de fallo de las probetas se muestra en la [figura 2.59](#).

#### 2.5.4 Tiempos de diseño y fabricación

En los tiempos recogidos en [tabla 2.24](#) se aprecia una diferencia bastante acusada en el tiempo establecido por el software Eiger® y el tiempo estimado por la impresora.

**Tabla 2.24** Tiempos empleados en el diseño y fabricación de la pieza 5.

Pieza	Catia®	Tiempo Eiger®	Tiempo Mark One®	Total
Probeta individual	1min	1h 18min	5h 09min	5h 10min
Panel	1min	5h 28min	17h 35min	17h 36min

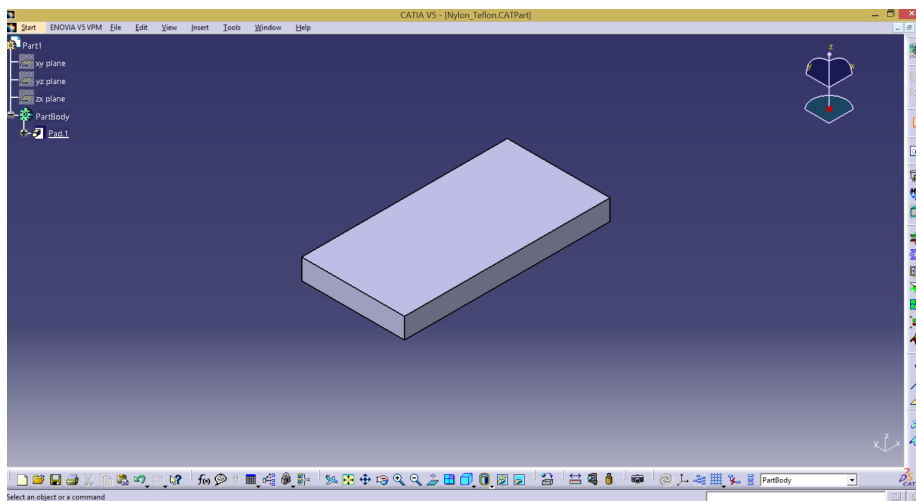
## 2.6 Pieza 6: Probeta con pregrieta

Para el desarrollo de futuras aplicaciones se ha querido comprobar como se comporta la impresión al incorporar cuerpos extraños.

Se ha impreso una pieza de nylon a la que se le ha incorporado en la mitad del espesor una lámina de teflón para comprobar la adhesión a este cuerpo extraño y si posteriormente a la impresión se puede retirar el desmoldeante. En caso de poderse eliminar fácilmente, se habría encontrado un método para incorporar una pregrieta a la pieza y así poder llevar a cabo ensayos de tenacidad a la fractura.

### 2.6.1 Diseño en el software Catia®

Las dimensiones en milímetros del paralelepípedo fueron 50x25x5.



**Figura 2.60** Geometría a la que generar la pregrieta.

### 2.6.2 Fabricación con la impresora Mark One®

La primera prueba se realizó sobre un paralelepípedo de dimensiones 50mm x 25mm x 5mm situado en el centro de la cama de impresión con los lados paralelos a los de la cama.



**Figura 2.61** Influencia de la colocación del Teflón.

El teflón se colocó en los dos extremos de la probeta, para ver así cual era el extremo más indicado para situar el teflón. Esto está condicionado por la dirección respecto al teflón

en la que deposita el nylon la impresora. Observando que ocurre con el teflón en cada uno de los extremos se podrá determinar el lugar más adecuado para la colocación del desmoldeante.

En la [figura 2.61](#) se observar como el resultado difiere en función del extremo, encontrándose que es más favorable colocar el desmoldeante en el extremo izquierdo de la probeta, tal y como se ve en la imagen, que coincide con el extremo por el que el cabezal comienza la impresión de la capa.

Se paró la impresión en la capa intermedia para incorporar la lámina de teflón. La adhesión de la lámina de teflón a la cama se realizó correctamente, sin embargo, al continuar la impresión, la capa de nylon no se adhirió al teflón.

El segundo método empleado para realizar la pregrieta consistió en girar  $45^\circ$  la pieza de nylon para así conseguir la deposición del filamento de nylon en una orientación  $0^\circ - 90^\circ$  para comprobar si de esta forma el cabezal no despega el teflón una vez colocado éste en la capa intermedia.

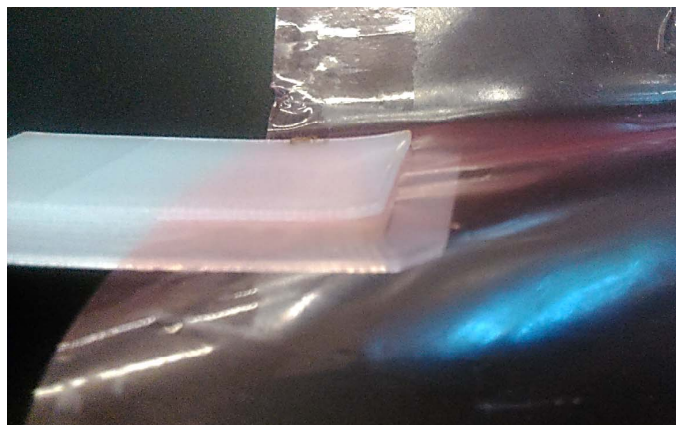
Dentro de este método se trabajó con dos opciones:

- Parar la impresión en la capa 20 y que la siguiente capa la imprima a  $0^\circ$ .
- Parar la impresión en la capa 21 y que la siguiente capa la imprima a  $90^\circ$ .

La primera opción falló. Esta vez se acumuló nylon en el borde de la lámina de teflón, por esto se decidió probar la opción dos, con la que se consiguió la correcta adhesión del nylon al teflón de forma local.

La dos opciones anteriormente enumeradas fallaron ([figura 2.61](#)), por lo que se decidió aumentar el espesor de la capa de nylon a 0.2mm (antes estaba en 0.1mm) y poner el mismo pegamento que se utiliza en la cama de impresión, tanto en la lámina de teflón como en la pieza de nylon. La capa de nylon inmediatamente superior a la lámina de teflón se orienta a  $90^\circ$ .

Posteriormente, se probó a aplicar temperatura con una pistola de aire caliente. De esta forma se consiguió adherir el borde perimetral de la capa inmediatamente superior al teflón, pero no ocurrió lo mismo con la zona central. Se probaron distintas orientaciones de la fuente de calor para ver si influían para conseguir la adhesión en la zona central, pero no se logró la adhesión completa en dicha zona.



**Figura 2.62** Pregrieta generada.

De igual forma, se probó incorporar dos capas de fibra de vidrio antes de la deposición del teflón y dos después, ya que al ser la fibra más rígida se pensó que la deposición de ésta iba a ser más sencilla. La impresión con la fibra de vidrio falló de nuevo por la incorrecta adhesión de la fibra de vidrio al teflón.

Por último, se precalentó la lámina de teflón antes de empezar la deposición de nylon (a 0°). Esta vez sí se consiguió una adherencia perfecta de la capa que se situó por encima del teflón, pero al retirar la fuente de calor aparecieron tensiones residuales que provocaron el *warping* de las capas depositadas después del teflón (figura 2.62).

### 2.6.3 Ensayos y aplicaciones

Como se ha mencionado anteriormente, se ha conseguido generar una pregrieta siguiendo el método enumerado a continuación:

1. Pausar la impresión en la capa en la que se desee generar la pregrieta.
2. Añadir el pegamento proporcionado en el *kit de accesorios* a la pieza en proceso de impresión y al desmoldeante. Precalentar ambas partes.
3. Colocar el desmoldeante en la pieza y fijarlo a la cama de impresión.
4. Añadir de nuevo pegamento al conjunto y aplicar temperatura.
5. Continuar la impresión sin retirar la fuente de calor.

Remarcar que la orientación de la fuente de calor si el precalentamiento ha sido correcto no afecta. Aún así, es recomendable aplicar el calor por la zona en la que se van a situar los extremos de la grieta.

Con la consecución de la pregrieta, se abre la puerta a la incorporación de cuerpos extraños durante la impresión 3D. Existen limitaciones para esta inclusión, tanto en tamaño como en material.

Hay que tener en cuenta si el material se va a extraer o no posteriormente, ya que su naturaleza será distinta.

### 2.6.4 Tiempos de diseño y fabricación

Vuelve a ser despreciable el tiempo de diseño de la pieza por ser una geometría simple.

**Tabla 2.25** Tiempos empleados en el diseño y fabricación de la pieza 6.

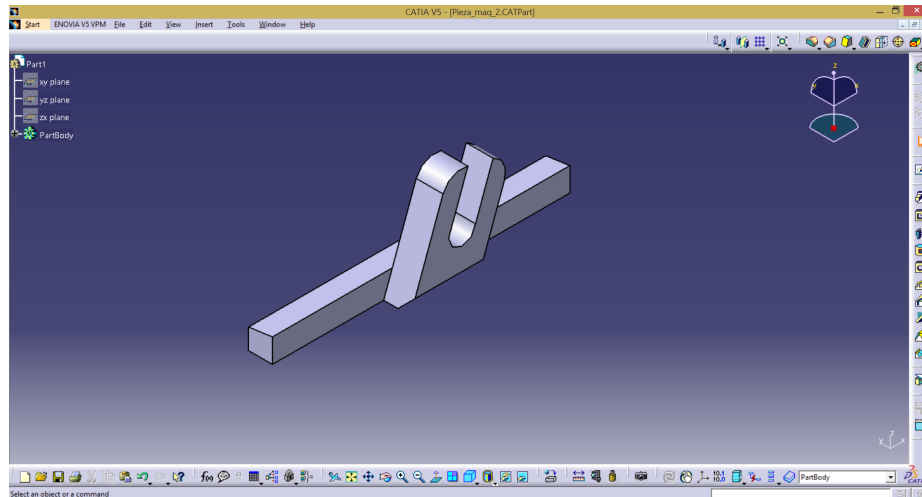
Catia®	Tiempo Eiger®	Tiempo Mark One®	Total
1min	1h 08min	48min	49min

## 2.7 Pieza 7: Pieza para máquina de ensayos

Una pieza de una de las mordazas de las máquinas de ensayo quedó inutilizada, por ello se diseñó y fabricó en la impresora 3D.

### 2.7.1 Diseño en el software Catia®

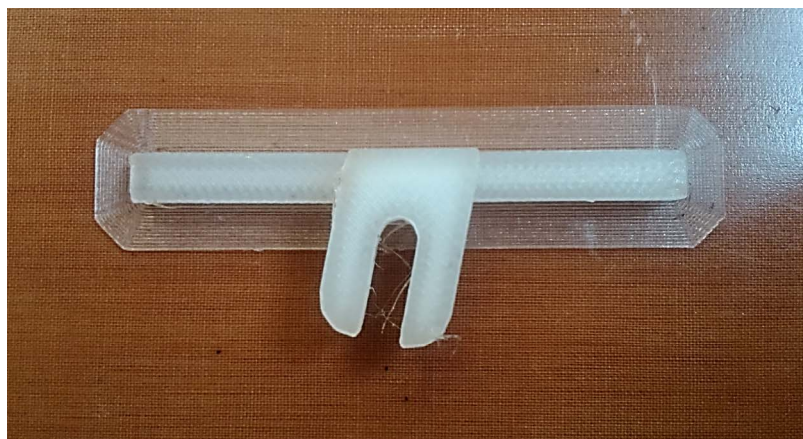
La dimensiones se obtuvieron a partir de una pieza similar y con la ayuda de un calibre.



**Figura 2.63** Diseño de la pieza para la máquina de ensayos.

### 2.7.2 Fabricación con la impresora Mark One®

La pieza para incorporar a la mordaza de la máquina de ensayos se imprimió en nylon con un mallado rectangular de densidad 100 % para que fuera lo más resistente posible.



**Figura 2.64** Pieza para la mordaza de la máquina de ensayos.

Se probó también a fabricarla en fibra de vidrio, pero el software emitió un mensaje de error ya que el tamaño es demasiado reducido como para incorporar fibra.





**Figura 2.65** Pieza montada en la mordaza.

### 2.7.3 Ensayos y aplicaciones

La pieza se colocó en la mordaza el 1 de Abril de 2016 y cumple su función.

### 2.7.4 Tiempos de diseño y fabricación

En este caso no es despreciable el tiempo de diseño ya que fue necesario medir sobre la pieza para poder realizar el modelo Catia® con las dimensiones exactas. La geometría no es excesivamente complicada, pero requiere planificación en el diseño de las distintas partes.

**Tabla 2.26** Tiempos empleados en el diseño y fabricación de la pieza 7.

Catia®	Tiempo Eiger®	Tiempo Mark One®	Total
4h 25min	46min	45min	5h 10min

## 2.8 Pieza 8: Moldes

Para comprobar el acabado superficial y la calidad del laminado sobre moldes fabricados mediante impresión 3D, se diseñó un molde para fabricar en nylon.

El objeto es comprobar la dificultad del proceso de laminado sobre estos moldes y estudiar como se comportan tras el autoclave.

### 2.8.1 Diseño en el software Catia®

#### Molde de nylon v1

La geometría fue proporcionada, pero hubo que editarla para incorporar desde Catia® un *Brim* para que la impresión no tuviera problemas (figura 2.66).

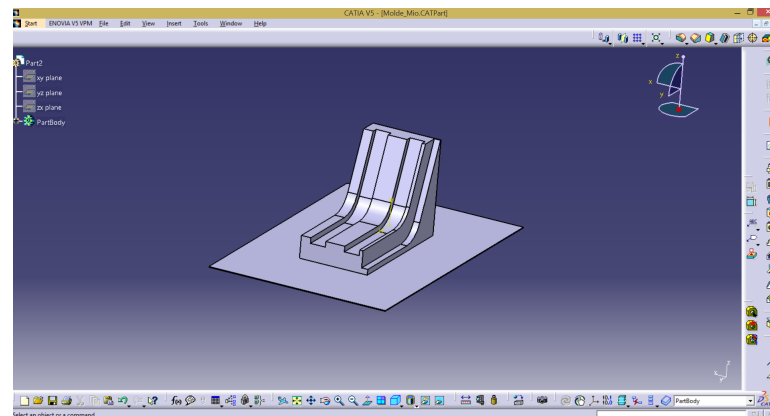


Figura 2.66 Molde de nylon con *Brim* para laminado posterior.

#### Molde de nylon v2

Cumpliendo con unos requisitos se diseñó el molde que se muestra en la figura 2.67. La diferencia principal con el anterior es la curvatura de las ondas, en este caso son mucho más suaves, lo que va a facilitar el laminado.

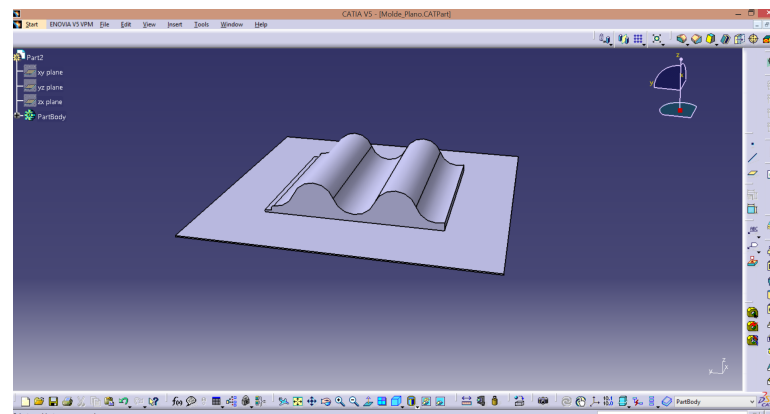


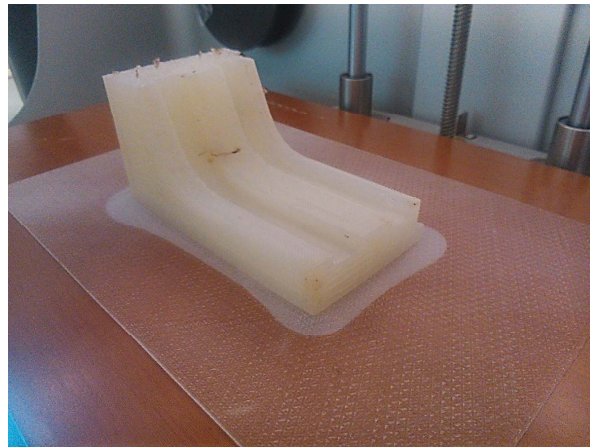
Figura 2.67 Molde de nylon con ondas.

Como se observa en la figura 2.67, se incluyó el *Brim* desde Catia® para que la impresión fuera satisfactoria.



### 2.8.2 Fabricación con la impresora Mark One®

#### Molde de nylon v1



**Figura 2.68** Molde de nylon.

Gracias a añadir el *Brim manual* desde Catia®, la impresión no falló, ya que como se observa en [figura 2.68](#), en las proximidades de la pieza el *Brim manual* se despegó de la cama de impresión, provocando también la separación de la base de la pieza.

Una vez que se laminó el tejido de fibra de vidrio sobre el molde se introdujo en el autoclave para curarlo. Se obtuvo una geometría que se aproximaba al molde, pero no llegaba a adquirir exactamente la curvatura de éste.

### 2.8.3 Ensayos y aplicaciones

#### Molde de nylon v1

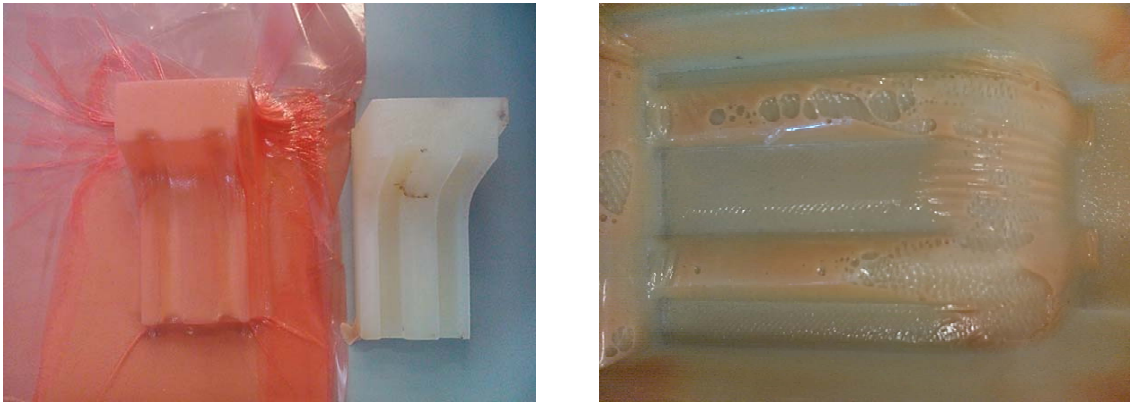
Para laminar se utilizó tejido de fibra de vidrio. Se quiso fabricar un laminado de ocho capas para lo que se consideraron dos métodos:

1. Método 1: cortar las ocho láminas y laminar con el espesor conformado por la ocho de una sola vez.
2. Método 2: laminar de una en una las láminas sobre el molde y posteriormente pegarlas unas encima de otras.

Se comenzó con el método 1 inicialmente con cinco láminas para probar la curvatura que se podía conseguir. No se llegó a conseguir que el laminado adquiriera la curvatura del molde, por lo que se procedió con el método 2.

El problema del segundo método surgió en el momento de pegar una lámina a otra. En este caso las láminas sí adquirieron la curvatura del molde, pero a la hora de pegar una sobre otra por la dificultad del pegado perdieron las curvas conseguidas. Ocurrió que, al pegar una sobre otra, la resina de ambas láminas se adhirieron en las zonas que no debían, por lo que hubo que empezar de nuevo a dar forma.

Finalmente se decidió utilizar un laminado de dos láminas que cogió de forma moderada la curvatura del molde, someterlo a un ciclo de curado en autoclave de tres horas a 120°C y presión y observar el resultado.



**Figura 2.69** Molde y pieza tras curado en autoclave.

Se obtuvo una geometría que se aproximaba al molde, pero no adquirió exactamente la curvatura de éste (figura 2.69).

La figura 2.69 muestra la curvatura alcanzada por la pieza tras el curado en autoclave. Se puede observar en la imagen de la derecha como la resina ocupó el espacio de las ondulaciones. Esto indica que la presión dada durante la laminación ha sido insuficiente. Sin embargo, las zonas que han adquirido la curvatura del molde presentan un acabado razonablemente bueno.

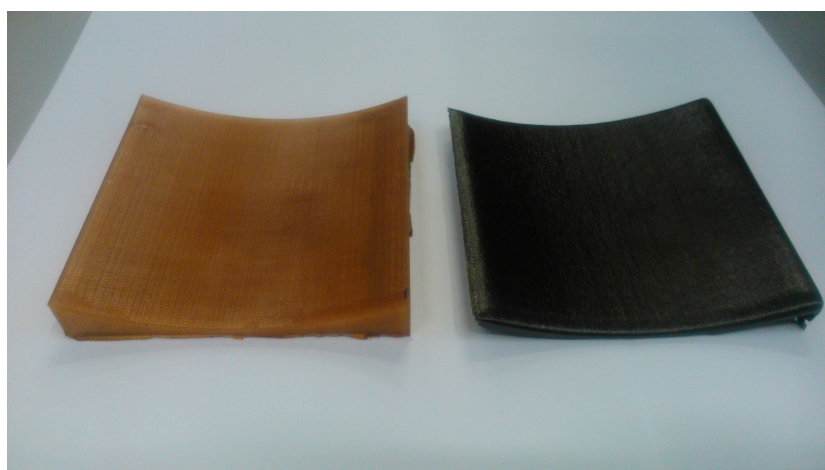
El estado dimensional del molde antes y después del curado en autoclave se recoge en el apéndice B.

### **Molde de nylon v2**

La impresión del molde falló, por lo que este molde no ha llegado a fabricarse.

### **Molde de ULTEM1010**

Se proporcionó el molde fabricado por impresora 3D de material ULTEM1010 para laminar sobre él fibra de carbono. El laminado fue simétrico con apilado  $[0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ]_s$ .



**Figura 2.70** Molde y panel tras curado en autoclave - I.

El desmoldeante utilizado fue teflón para así poder recuperar el molde tras el curado en autoclave del carbono.

Como se observa en la [figura 2.71](#), el panel obtenido se ajusta a la geometría del molde. Además, el molde está en perfecto estado para ser utilizado en posteriores ocasiones.



**Figura 2.71** Molde y panel tras curado en autoclave - II.

#### 2.8.4 Tiempos de diseño y fabricación

En este caso, los tiempos carecen de relevancia ya que el proceso no ha sido completo para ninguno de los casos. Se recoge únicamente el tiempo de fabricación del molde de nylon v1.

**Tabla 2.27** Tiempos empleados en la fabricación de la pieza 8.

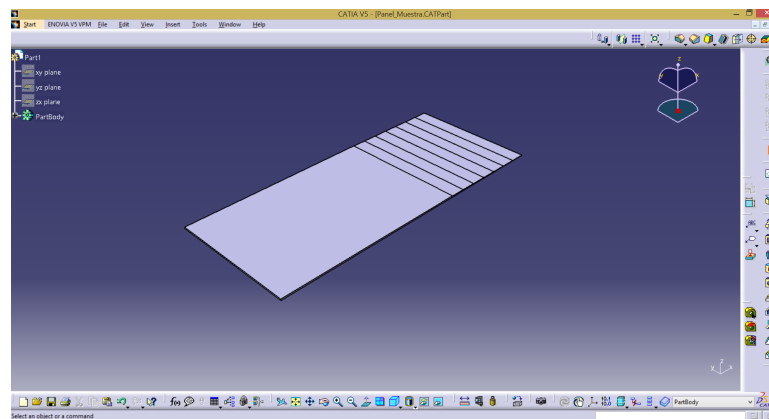
Tiempo Eiger <sup>®</sup>	Tiempo Mark One <sup>®</sup>
1d 2h	19h 45min

## 2.9 Pieza 9: Panel escalonado

Con el objeto de observar la calidad de la impresión de capas con distintos ángulos se diseñó un panel con uno de los extremos escalonados.

### 2.9.1 Diseño en el software Catia®

Se estableció que el panel iba a estar formado por ocho capas de fibra de vidrio, por lo que la altura de cada escalón se fijó igual al espesor de una capa de fibra de vidrio. Teniendo en cuenta que el software Eiger® coloca de forma automática una capa superior y otra inferior de nylon, hubo que considerarlas en el modelo Catia® para conseguir el objetivo de un panel de ocho capas.



**Figura 2.72** Diseño del panel escalonado.

De esta forma, el espesor del escalón inferior y el superior se estableció en 0.2mm para considerar la altura de una capa de fibra de vidrio y otra de nylon. Los escalones intermedios tienen un espesor de 0.1mm.

### 2.9.2 Fabricación con la impresora Mark One®

La secuencia de apilado impresa fue  $[90^\circ/0^\circ/-45^\circ/+45^\circ]_s$ .



**Figura 2.73** Panel escalonado.

La zona de la izquierda del panel es la de menor espesor y la que cuenta con menor número de capas de fibra de vidrio, por lo que es menos rígida. Esto se puede observar claramente en la ligera curvatura que adquirió la zona al retirar el panel de la cama de impresión (figura 2.73).

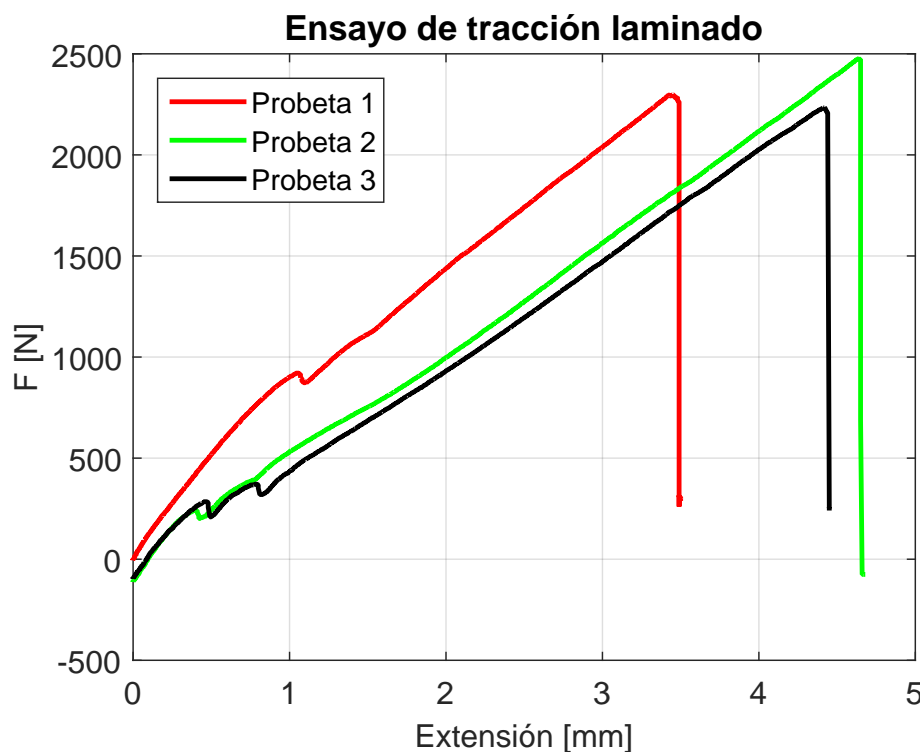
### 2.9.3 Ensayos y aplicaciones

Una vez fabricado el laminado simétrico se obtuvieron las probetas que se ensayaron hasta rotura sin incorporarles tacones ni extensómetro.

Las dimensiones de las probetas se recogen en la tabla 2.28.

**Tabla 2.28** Dimensiones probetas laminado fibra de vidrio.

Probeta	Ancho [mm]	Espesor total [mm]	Espesor sin capas [mm]
P1	12.57	1.142	0.942
P2	12.64	1.137	0.937
P3	12.72	1.142	0.942



**Figura 2.74** Ensayo de tracción del laminado.

En la figura 2.74 se muestran los resultados de los ensayos. Se detalla por probeta lo que se observa:

- Probeta 1. Se pueden diferenciar dos cambios de tendencia en la curva, siendo el primero más acusado que el segundo y produciéndose en niveles de carga cercanos (920N y 1118N). La probeta rompió para una carga de 2296N.

- Probeta 2. Se aprecian tres cambios de tendencia en los niveles de carga 240N, 410N y en el entorno de los 900N hasta que rompe para una carga de 2473N.
- Probeta 3. Se observan dos cambios de tendencia (280N y 371N) y la rotura final a una carga de 2236N.

Los cambios de tendencia, a priori, responden a roturas en las láminas.

#### **2.9.4 Tiempos de diseño y fabricación**

Destacar la diferencia en los tiempos del software Eiger<sup>®</sup> y la impresora ([tabla 2.29](#)).

**Tabla 2.29** Tiempos empleados en el diseño y fabricación de la pieza 9.

<b>Catia<sup>®</sup></b>	<b>Tiempo Eiger<sup>®</sup></b>	<b>Tiempo Mark One<sup>®</sup></b>	<b>Total</b>
10min	2h 34min	4h 34min	4h 44min



## 3 Aspectos destacados del estudio

---

A continuación se recogen aspectos que se han considerado destacados durante el desarrollo del trabajo.

### 3.1 Resumen de propiedades obtenidas

Se recopilan en este apartado las propiedades obtenidas con los ensayos realizados.

Se van a obtener las propiedades considerando el espesor total de las probetas y sin las capas superior e inferior de nylon que deposita de forma automática la impresora.

#### 3.1.1 Nylon

El objeto de los ensayos realizados a probetas de nylon fue determinar las propiedades de este material en la dirección perpendicular al plano de impresión y compararlas con las ya obtenidas en el plano de impresión [21].

Se ha obtenido para el mallado rectangular con densidad 100%:

- $E = 335.66\text{MPa}$
- Tensión última:  $13.51\text{MPa}$

De [21] se sabe que el módulo elástico en el plano de impresión para el nylon con patrón rectangular de densidad 100% es  $385.97\text{MPa}$ , por lo que los resultados obtenidos muestran una disminución en éste del 13.03%. En cuanto a la resistencia, no se tienen datos con los que comparar.

Esta diferencia de propiedades puede estar provocada por la no compactación en la dirección de impresión, ya que los cabezales únicamente depositan el material sin aplicar presión alguna.

#### 3.1.2 Fibra de vidrio

Para la fibra de vidrio se han realizado ensayos de compresión para obtener las características resistentes del material.

Por defecto, la capa superior e inferior de cada pieza están compuestas de nylon. En la [tabla 3.1](#), *Con capas exteriores* indica que las propiedades se han calculado con el espesor total de la pieza, incluidas las capas de nylon. *Sin capas exteriores*, indica el cálculo de las

propiedades con el espesor real constituido por material compuesto y sin las capas superior e inferior de nylon.

**Tabla 3.1** Características a compresión. Fibra de vidrio.

Propiedad	Con capas exteriores	Sin capas exteriores
$X_c$ (MPa)	77.22	84.53
$Y_c$ (MPa)	23.55	25.72

Se han comparado los resultados obtenidos con los proporcionados por el fabricante. Éste únicamente proporciona un valor de resistencia a la compresión sin especificar nada más.

### 3.1.3 Fibra de carbono

Los ensayos de compresión de la fibra de carbono han servido para determinar características resistentes y de rigidez del material.

**Tabla 3.2** Características a compresión. Fibra de carbono.

Propiedad	Con capas exteriores	Sin capas exteriores
$E_{22}$ (GPa)	3.07	3.46
$Y_c$ (MPa)	41.82	47.07

Al igual que en el caso de la fibra de vidrio, *Con capas exteriores* y *Sin capas exteriores* hace referencia al espesor utilizado en el cálculo de las propiedades.

## 3.2 Tiempos de fabricación

En la [tabla 3.3](#) se recogen los tiempos establecidos por el software para la impresión de cada una de las piezas en la columna *Tiempo Eiger*<sup>®</sup>. Al cargar el archivo a la impresora y comenzar la impresión, en la pantalla LCD se muestra el tiempo estimado que durará la impresión. Este tiempo se recoge en la columna *Tiempo Mark One*<sup>®</sup>. En la columna *Incremento* se muestra la diferencia en valor absoluto entre el tiempo mostrado por el software y el proporcionado por la impresora.

Se observan diferencias entre ambos tiempos, pero con los datos obtenidos no se puede extraer una conclusión clara sobre el porqué de la variación.

Se ha comprobado que cuanto mayor sea la cantidad de nylon que emplea la impresión, la diferencia entre los tiempos es mayor, siendo menor el tiempo mostrado por la impresora.

Al incorporar fibra a la impresión, la diferencia aumenta siendo mayor el tiempo mostrado por la impresora.



**Tabla 3.3** Tiempos estimados por Eiger® vs. Mark One®.

Geometría	Tiempo Eiger®	Tiempo Mark One®	Incremento
Pieza 1	41min	32min	9min
Pieza 2.1	17h 42min	19h 32min	1h 50min
Pieza 2.2	1d 1h	1d 30min	29min
Pieza 2.3	22h 2min	22h 58min	56min
Pieza 3	17h 47min	9h 41min	8h 6min
Pieza 4	4h 41min	4h 35min	6min
Pieza 5 (probeta)	1h 18min	5h 09min	3h 51min
Pieza 5 (Panel)	5h 28min	17h 35min	12h 7min
Pieza 6	1h 08min	48min	1h 8min
Pieza 7	46min	45min	1min
Pieza 8 (Molde v1)	1d 2h	19h 45min	6h 15min
Pieza 9	2h 34min	4h 34min	2h

El tiempo real corresponde al mostrado en la columna *Tiempo Mark One®*



## 4 Mantenimiento de la impresora Mark One®

---

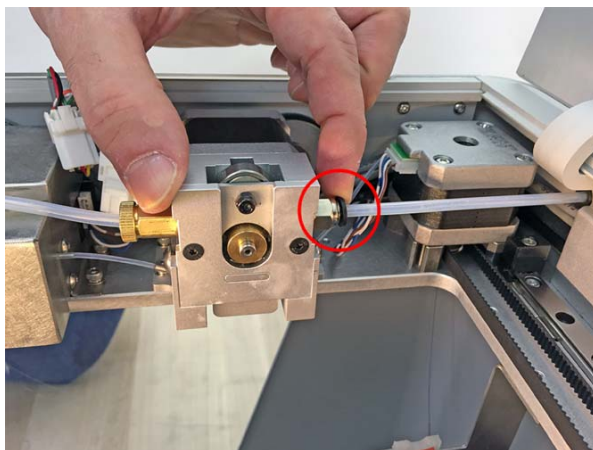
En este capítulo se detalla el mantenimiento que ha sido necesario realizar a la impresora provocado por el uso y para conseguir un mejor ajuste de la impresión.

En la página de soporte del software Eiger® se detallan más procedimientos, sin embargo, se ha querido seleccionar los encontrados durante el desarrollo del trabajo actualizados con la versión de firmware que actualmente está instalada en la impresora, ya que si bien en general los pasos son los indicados en el soporte técnico, no están actualizados con el firmware.

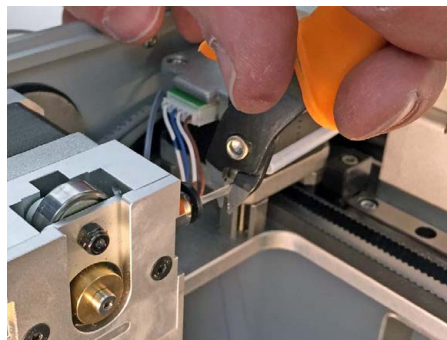
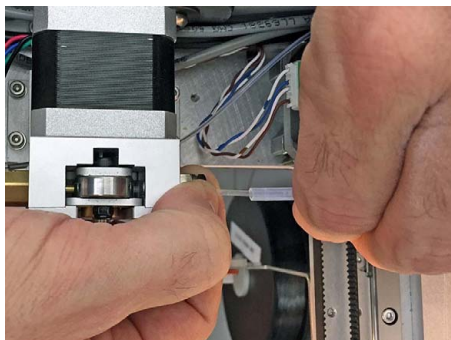
### 4.1 Limpieza del sistema de nylon

Se explica en esta sección el mantenimiento realizado sobre el sistema de nylon. En el caso en el que se sustituya o extraiga la boquilla de nylon será necesaria la nivelación de la cama de impresión y el ajuste de altura de las boquilla de nylon y fibra posteriormente.

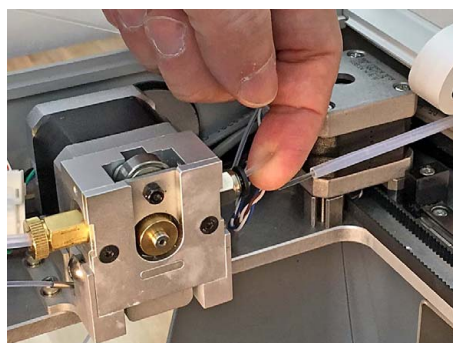
1. Empujar el conector de color negro para liberar el tubo de alimentación del nylon.



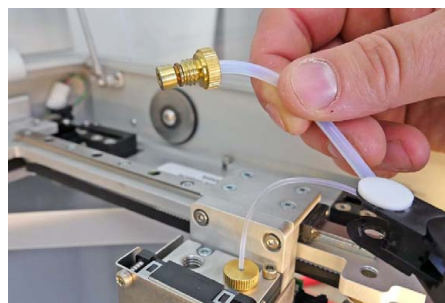
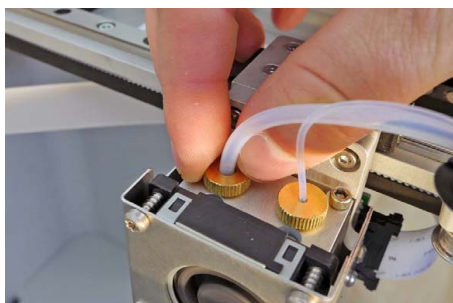
2. Tirar del tubo de plástico del conector hasta que el filamento de nylon quede expuesto y cortar el filamento.



3. En la pantalla LCD, en el menú de la esquina superior derecha, seleccionar *Load / Unload Material* y seleccionar *Unload Nylon*.
4. La boquilla de nylon comenzará a calentarse. Una vez completado, aparecerá el botón *Next*, presionarlo para continuar.
5. Ahora la impresora purgará el filamento de nylon del sistema, empujándolo hacia atrás de la extrusora de nylon. Coger el material mientras sale, ayudándolo a salir de la extrusora de nylon. Cuando deje de salir el material pulsar *Stop* en la pantalla.



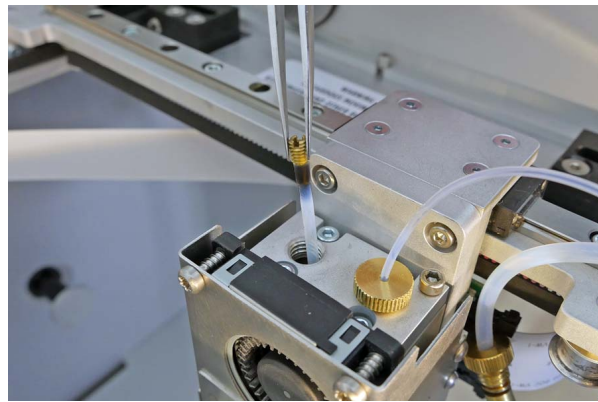
6. Con el cabezal de impresión aún caliente, desenroscar el adaptador del tubo Bowden de nylon para extraerlo del cabezal. El cabezal continúa a una temperatura elevada, por lo que hay riesgo de quemadura local.



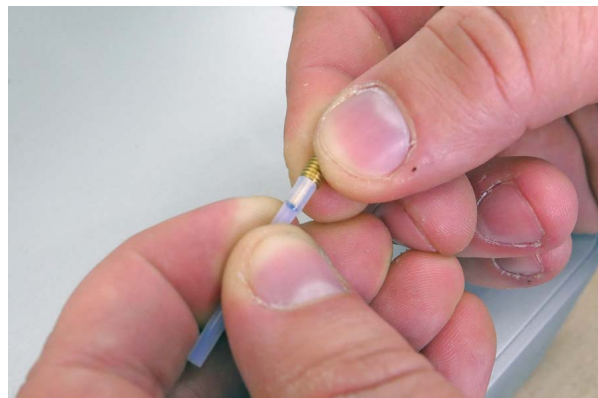
7. Observar por el agujero del cabezal de nylon y localizar la pequeña pieza de latón.
8. Utilizando el destornillador de cabeza plana del kit de accesorios desenroscar la pieza hasta que quede completamente fuera.



9. Con las pinzas de precisión, extraer la pieza de latón del cabezal junto con el tubo PTFE unido a ella.



10. Dejar enfriar tanto el cabezal de impresión como la pieza de latón por debajo de 40°C.
11. Desenroscar el tubo PTFE de la pieza de latón y cambiarlo en caso de que presente daños. Si no está dañado, debe limpiarse para volver a utilizarlo. Volver a colocar el tubo PTFE en la pieza de latón.



12. Utilizando el destornillador de vaso hexagonal proporcionado en el kit de accesorios desenroscar y extraer cuidadosamente la boquilla de nylon.

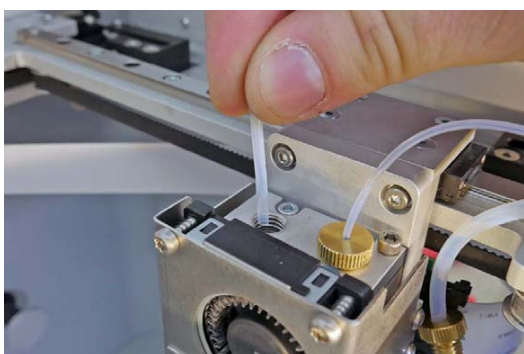




13. Con el escariador del kit de accesorios cercionarse de que el canal de nylon no está obstruido introduciéndolo por la parte superior del cabezal hasta que salga por la parte inferior. En caso de obstrucción (en ocasiones residuos sólidos de nylon o PTFE) puede que sea necesario calentar el cabezal. Para ello seleccionar la opción desde las *Utilities* del menú y utilizar el escariador para eliminar cualquier obstrucción. Una vez que la obstrucción está resulta, dejar enfriar por debajo de 40°C.



14. Mirar a través del canal de nylon para asegurar que está libre de obstrucciones. Debe verse luz en la parte inferior del cabezal, indicativo de paso libre del material.
15. Reinsertar el tubo PTFE en el canal de nylon, si es necesario utilizar las pinzas proporcionadas.



16. Utilizando el destornillador de cabeza plana para enroscar la pieza de latón hasta que

quede enrasada con la parte inferior del orificio del cabezal de impresión. Si está muy alto, el tubo Bowden no asentará completamente. Si se enrosca demasiado se puede doblar el tubo PTFE en la boquilla.



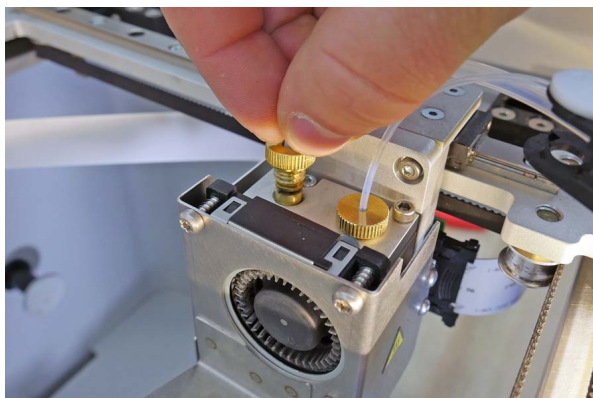
17. Aplicar una pequeña cantidad de lubricante a las roscas de la boquilla de nylon. En caso de estar deteriorada se sustituirá.



18. Enroscar y desenroscar varias veces la boquilla de nylon para que el lubricante se distribuya uniformemente.
19. Utilizando el destornillador de vaso hexagonal proporcionado apretar la boquilla hasta que toque con el calentador.



20. Volver a colocar el adaptador del tubo Bowden del nylon.



21. Ejecutar la rutina *Load Nylon*.

## 4.2 Calibración del nylon

El propósito de esta prueba es determinar si el sistema de extrusión del nylon está funcionando correctamente.

La prueba extruye una cantidad conocida de nylon. Basado en el comportamiento de la impresora durante la prueba y la masa de la cantidad de nylon extruida puede saberse si existen problemas en la extrusión del nylon.

En primer lugar, la prueba expurga el sistema de nylon. Hay que asegurarse de recoger y eliminar la primera extrusión.

Precaución con la temperatura alcanzada por la extrusora y la boquilla de nylon durante la prueba. No tocar ni la boquilla ni la extrusora con las manos y utilizar las pinzas para coger el nylon.

Procedimiento para la calibración del nylon:

1. En el menú de *Utilities* seleccionar la opción *Calibration Extrude Test*.
2. Seguir los mensajes de la pantalla LCD para comenzar la prueba.
3. La máquina empezará a calentar la boquilla de nylon.
4. Una vez que la máquina ha alcanzado la temperatura, en la pantalla aparece un mensaje para continuar con la prueba.
5. La impresora comenzará entonces a extruir nylon y purgar el sistema.
6. En cuanto realiza la purga del sistema, se escucha el movimiento de retracción de la extrusora de nylon y se para durante dos segundos.
7. Durante la pausa, retirar el nylon extruido de la boquilla.
8. Después de la pausa, la máquina comenzará a extruir nylon de nuevo. Este nylon es el que se utiliza para calibrar el sistema.
9. Durante esta prueba se escucha el click de la extrusora de nylon. Si la extrusora hace un sonido de click y los rodillos son sacudidos hacia atrás indica que la resistencia del sistema de nylon es demasiado elevada.



10. Una vez que la máquina ha terminado de extruir recoger cuidadosamente el nylon extruido con las pinzas.
11. En una balanza de precisión de al menos 1mg, pesa el nylon. Debe estar entre 0.1800g y 0.2100g.
12. Si la extrusora de nylon va a saltos durante la prueba, o el peso del nylon es inferior a 0.1800g, consultar la guía de resolución de problemas del soporte del software Eiger®.

### 4.3 Desatasco y limpieza de la boquilla de fibra

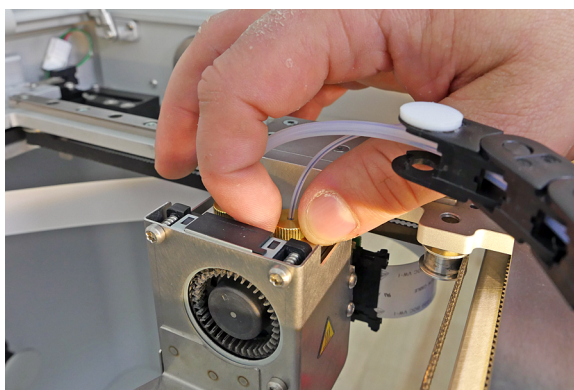
En el caso en el que se sospeche que existe una obstrucción en la boquilla de fibra es necesario limpiarla. Indicativo de una obstrucción en la boquilla es que el material pase a través de la extrusora y el tubo Bowden sin problemas, sin embargo, no salga por la boquilla.

En primer lugar, es necesario que ambos cabezales de impresión se encuentren a temperatura ambiente.

Una vez que los cabezales se encuentran a la temperatura adecuada se procede a su limpieza como se explica a continuación.

1. Una vez que la temperatura de los cabezales está por debajo de 40°, desenroscar el adaptador del tubo Bowden de fibra del cabezal de impresión ([figura 4.1](#)).

En el caso de encontrarse el tubo Bowden como muestra la [figura 4.2](#) esto será indicativo de que existe un atasco en la boquilla de fibra.



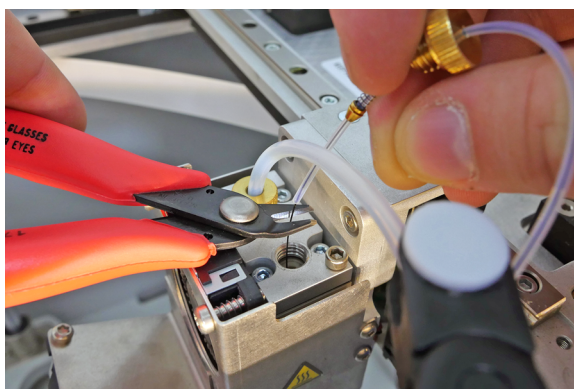
**Figura 4.1** Desenroscado del adaptador.

2. Extraer el tubo del cabezal de impresión una vez desenroscado. Si el filamento de fibra no sale libremente del cabezal de impresión, será necesario cortar la fibra con un cortador de cables o una tijera y con precaución ([figura 4.3](#)).
3. Una vez cortada la fibra, intentar tirar de ésta para sacarla del tubo Bowden. En caso de no poder tirar de ella no forzar la salida, actuar el *Fiber Cutter* desde las utilidades utilizando la pantalla LCD.

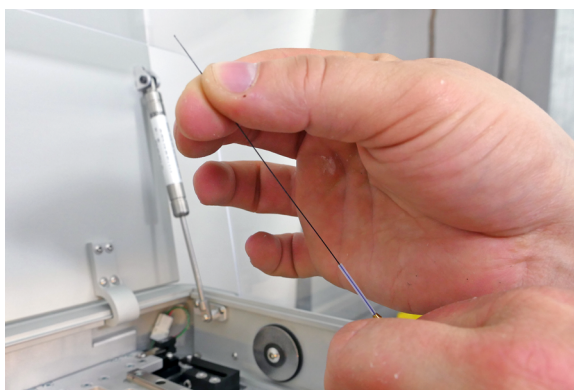
Después de cortarla, tirar de la fibra a través del tubo Bowden como se muestra en la [figura 4.4](#)



**Figura 4.2** Boquilla atascada con fibra de carbono.



**Figura 4.3** Cortado de la fibra.

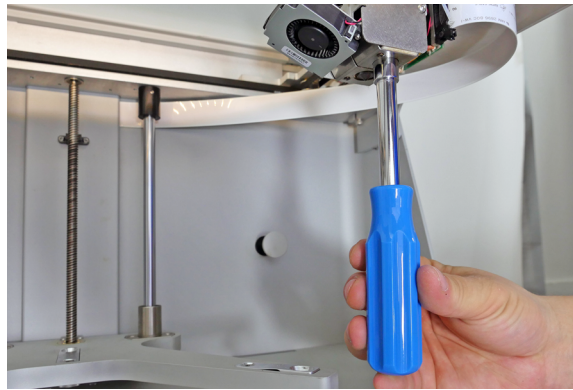


**Figura 4.4** Extracción de la fibra del tubo Bowden.

4. Utilizando el destornillador de vaso hexagonal proporcionado en el kit de accesorios ([figura 4.5](#)), desenroscar cuidadosamente y extraer la boquilla de fibra.

Generalmente, el tubo de plástico que va a la boquilla saldrá con ésta. En caso de no ser así, utilizar el escariador del kit de accesorios para empujar el tubo para que salga por la parte de abajo del cabezal de impresión introduciendo el escariador por la parte de arriba del cabezal.

5. Instalar un nuevo tubo PTFE en la nueva boquilla, asegurándose que se introduce hasta el fondo. No es necesario sustituir el tubo PTFE si no está dañado, al igual que



**Figura 4.5** Destornillador de vaso hexagonal.

la boquilla. En caso de que sigan cumpliendo su función adecuadamente, únicamente se llevará a cabo la limpieza de estos dos elementos.

6. Una vez hecho lo anterior aplicar una pequeña capa de lubricante en la boquilla y enroscar y desenroscar varias veces la boquilla en el cabezal de impresión para distribuir de la manera más uniforme posible el lubricante para que sea más sencillo extraer la boquilla cuando se requiera.
7. Utilizando de nuevo el destornillador de vaso hexagonal, apretar la boquilla hasta que toque con el bloque calentador del cabezal.
8. Reintroducir el adaptador del tubo Bowden y posteriormente cargar el material desde la pantalla LCD.

## 4.4 Desatasco y limpieza del tubo Bowden

Puede ocurrir que el tubo Bowden que conduce la fibra desde la extrusora hasta el cabezal de impresión albergue en su interior pequeños fragmentos de fibra. Es necesario retirar estos fragmentos, ya que de otra forma van a provocar el fallo en posteriores impresiones.

En primer lugar es recomendable desenroscar el adaptador del tubo Bowden de fibra del cabezal de impresión y sacar el otro extremo del tubo Bowden de la extrusora ([figura 4.6](#)).

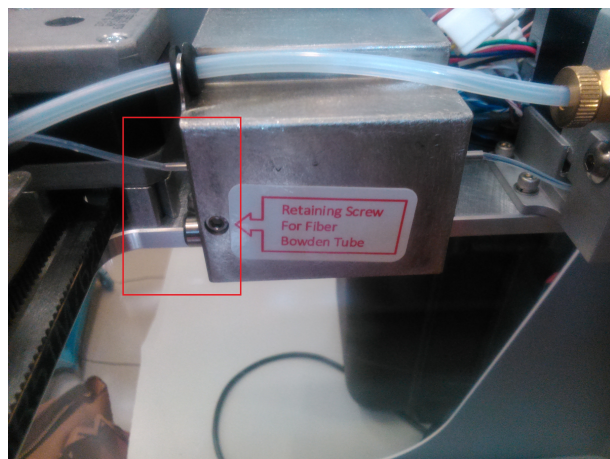
En el caso en el que los fragmentos sean de una longitud considerable se puede intentar extraerlos empujando cuidadosamente desde uno de los extremos del tubo Bowden con un fragmento de fibra. Este fragmento será lo suficientemente largo como para salir por ambos extremos del tubo Bowden y no quedar atascado dentro.

Si por el contrario los fragmentos de fibra son pequeños, se puede intentar retirarlos inyectando aire por el tubo Bowden.

## 4.5 Desatasco y limpieza de la extrusora de fibra

La extrusora de fibra es uno de los elementos fundamentales de la impresora. Si su funcionamiento no es el correcto la impresión no será satisfactoria.

La función de la extrusora es cortar la fibra y conducir el material por el sistema de tubos.



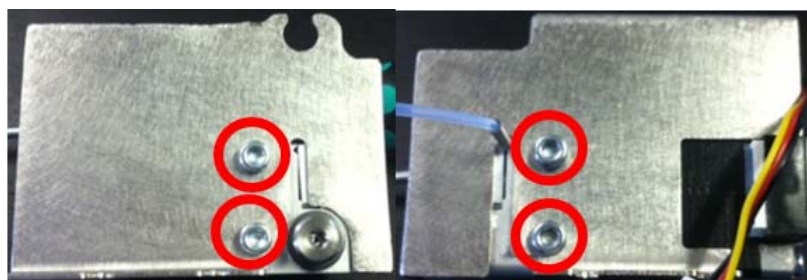
**Figura 4.6** Extremo del tubo Bowden en la extrusora de fibra.

En el caso en el que no se realice correctamente la carga del material o durante la impresión con fibra ésta no salga por el cabezal de impresión, se puede sospechar que el problema derive de un atasco en la extrusora.

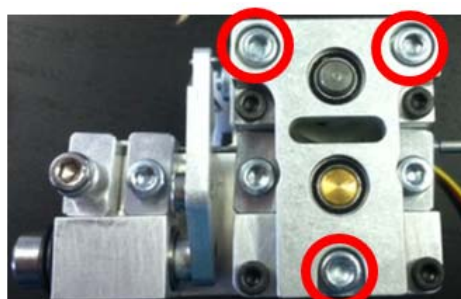
Si esto es así, es recomendable parar la impresión y chequear que no hay un problema en los tubos que conducen la fibra.

Descartado el problema en los tubos, se procede a limpiar la extrusora:

1. Tras retirar la extrusora de la impresora, desenroscar los dos tornillos que tiene la carcasa de la extrusora por cada lado.

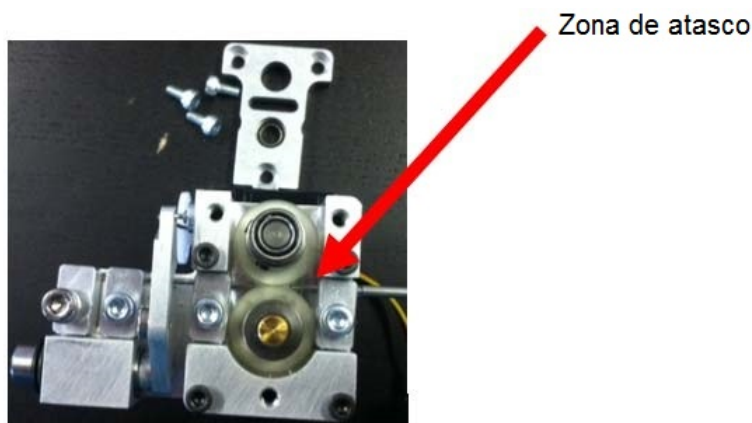


2. Una vez retirada la carcasa, desenroscar los tornillos que mantienen en su sitio la pieza que cubre los rodillos.



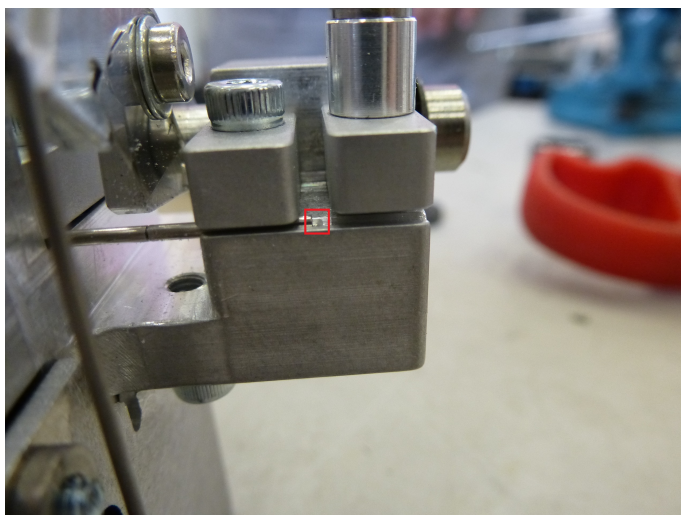
3. Una vez extraída esta pieza examinar los rodillos y quitar cualquier fragmento de fibra que pueda ocasionar un atasco.





4. Comprobar el desgaste de los rodillos. En caso de no tener que sustituir nada, volver a montar la extrusora, colocarla de nuevo en la impresora y cargar el material.

Si el atasco es del tipo que se indica en la [figura 4.7](#) se soluciona introduciendo por el otro extremo un fragmento de fibra que empuje al que está atascado.



**Figura 4.7** Atasco en la extrusora de fibra.

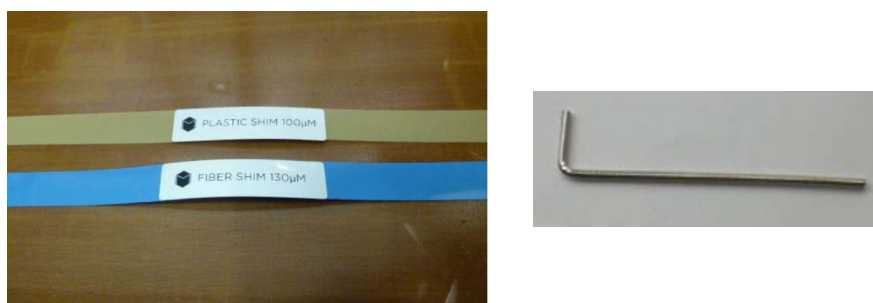
En caso de que el atasco se mantenga, puede ser que en los rodillos de la extrusora se haya acumulado material que habrá que extraer desmontando la parte de los rodillos como se ha detallado anteriormente.

El orden en el que se han explicado las distintas labores de mantenimiento del sistema de fibra no es aleatorio. En el caso de encontrar un problema en el sistema que haga que la impresión no cumpla con los requisitos, es recomendable proceder en este orden: boquilla, tubo Bowden y extrusora. Esta secuencia de mantenimiento se ha considerado la adecuada ya que es creciente en tiempo, frecuencia y dificultad.

## 4.6 Nivelación de la cama de impresión

Periódicamente es recomendable realizar la nivelación de la cama de impresión para conseguir la máxima precisión y calidad en las impresiones. De igual forma, en caso de

actualización del firmware es necesario realizar la nivelación.



**Figura 4.8** Calzadores de nivelación y llave Allen.

Para llevar a cabo la nivelación de la cama es necesario utilizar los calzadores de nivelación y la llave Allen del kit de accesorios (figura 4.8). Los calzadores ajustan la altura de los inyectores según el espesor del filamento. Se realiza al mismo tiempo la nivelación de la cama de impresión y el ajuste de la altura de los inyectores.

Pulsando la pestaña de *Settings* y seleccionando la opción *Level print bed* empezará la rutina. En la pantalla se van indicando los pasos que es necesario seguir.

En la última actualización de firmware en primer lugar advierte sobre no introducir ninguna parte del cuerpo en el transcurso de la nivelación y que son necesarios los calzadores para llevar a cabo la nivelación.

El resto de pasos son:

1. Aflojar los tres tornillos de la parte inferior de la plataforma hasta que se encuentre en la posición más baja sin que los tornillos se salgan. Cuando se hayan aflojado los tres tornillos pulsar *Next*.
2. En primer lugar se ajusta la altura del inyector de nylon, por lo que el cabezal de impresión se moverá hasta la posición que ocupa uno de los tornillos de la plataforma. Una vez parado el cabezal, deslizar el calzador amarillo *PLASTIC SHIM 100µM*.
3. A continuación, ajustar el tornillo situado debajo del cabezal hasta que al deslizar el calzador entre la cama de impresión y el cabezal se note una ligera resistencia.
4. Una vez ajustado el primer tornillo, siguiendo los pasos mostrados en la pantalla se ajustan los otros dos y posteriormente se vuelven a ajustar los tres.
5. Una vez ajustado el inyector de nylon es el turno del de fibra. El cabezal se coloca en la primera posición que se colocó al ajustar el de nylon. Con el cabezal ya situado se desliza el calzador *FIBER SHIM 130µM* y se ajusta la altura de éste a través del tornillo de cabeza Allen situado en la parte superior del cabezal de impresión. De igual forma que con el inyector de nylon, la altura estará ajustada cuando se sienta una leve resistencia al deslizar el calzador entre la cama y el cabezal.

Si durante el ajuste de alguno de los tornillos llega un punto en el que no gira más y hay demasiada holgura al deslizar el calzador, es necesario ajustar el *offset* en la dirección Z. Para esto es necesario cancelar la nivelación y seleccionar dentro de *Settings/Utilities/Adjust Z offset* y seguir las instrucciones. Una vez corregido el *offset* se puede iniciar la rutina de nivelación de la cama de impresión.

## 5 Dificultades encontradas

---

En este capítulo se detallan las dificultades encontradas por tipo de material utilizado. Posteriormente se enumeran otras dificultades no asociadas directamente al tipo de material empleado.

### 5.1 Piezas de nylon

- **Piezas con densidad de mallado 100 %**

La densidad de mallado del 100% confiere a las piezas fabricadas de esta forma una alta rigidez.

Cuando las capas en contacto con la cama de impresión se enfrían, provocado por la elevada rigidez, comienzan a separarse de la cama de impresión. Este hecho puede provocar el fallo de la impresión.

Este problema se puede solucionar incorporando el *Brim* de forma manual desde el modelo Catia® o reduciendo la densidad del mallado.

### 5.2 Piezas de fibra

- **Impresión de piezas que contengan fibra y utilicen gran cantidad material**

Al montar el archivo de impresión a través del software éste advierte con un mensaje de aviso cuando la cantidad de material utilizado supera la mitad del carrete o en el caso de utilizar más de un carrete. Indica que será necesario parar la impresión para cargar el nuevo material. Puesto que la impresora no se detiene ante la falta de material, será necesario parar la impresión, bien programándola en el software Eiger® o a través de la pantalla LCD pulsando *PAUSE* en la capa en la se desee la pausa. Hay que tener en cuenta que en el caso de la impresión con fibra, la máquina se detendrá al finalizar la capa completamente.

- **Destensión del carrete de fibra**

En el caso en el que el carrete de fibra por cualquier circunstancia no esté lo suficientemente tenso durante las impresiones de piezas que contengan fibra será necesario

prestar especial atención cuando la extrusora vaya cogiendo el material. De lo contrario en cada vuelta que complete el carrete, provocado por la destensión y la rigidez de la fibra, el material puede salir del carrete, provocando el fallo de la impresión y la pérdida de material.

## 5.3 Dificultades generales

- **La extrusora se alimenta de la fibra pero ésta no pasa a su través**

La extrusora está atascada. En este caso, lo primero es identificar el porqué del atasco.

Puede tratarse de un atasco al principio o al final del sistema de extrusión o en otro caso, el atasco puede estar provocado por la inclusión de fragmentos de fibra en el mecanismo de rodillos de la extrusora. En caso de sospechar que el atasco puede estar producido por un fragmento de fibra que no se encuentra en el lugar adecuado es necesario desmontar la extrusora, limpiarla y volverla a colocar.

- **No imprime nylon como un hilo continuo**

Este problema lo describen en el *Support* del software como *Nylon Under-extrusion*.

Puede ser debido a muchos motivos. En primer lugar lo mejor es asegurar que el nylon no está cogiendo humedad. Vigilar que la caja seca de pelícano esté cerrada y comprobar que el tubo de alimentación del nylon está correctamente situado a la salida de la caja y a la entrada de la extrusora del filamento de nylon.

Una vez comprobado que no es ésta la causa, se debería realizar la nivelación de la cama de impresión.

Si nivelar la cama tampoco es la solución, se puede cargar la rutina de calibración del nylon (los pasos están explicados en el apartado correspondiente de *Support* del software Eiger®).

En caso de que la calibración tampoco sea la solución se debería descargar el nylon de la impresora y una vez hecho volver a cargar el material.

- **La pieza no se adhiere correctamente a la cama de impresión**

Puede estar provocado por una aplicación incorrecta del pegamento a la cama. En caso de no ser esta la causa, puede ocurrir que la pieza necesite la incorporación de *Brim* manual.

Si sigue sin adherirse correctamente, nivelar la cama de impresión (dejar enfriar los cabezales de impresión hasta temperatura ambiente).

- **Fallo de la impresión provocado por una dislocación**

Una dislocación se produce al acumularse en una zona de la pieza filamento de nylon que no se ha adherido correctamente.

Esto ocurre cuando los cabezales chocan contra la pieza durante la impresión.

La causa suelen ser que la pieza se ha despegado de la cama de impresión, lo que provoca la inclinación de la pieza. Esto lleva a que se vaya acumulando material en una de las partes de la pieza, provocando el fallo de la impresión.



Para solucionarlo, si la pieza no incorporaba *Brim* sería conveniente incorporárselo.

Otra de las causas puede ser una limpieza deficiente del cabezal de impresión que provoca que el material se acumule en la boquilla y en un momento dado de la impresión se despegue de la boquilla y se deposita en la pieza. Con esto la impresora detectará un "obstáculo" y parará la impresión.

- **Despegue de la pieza de la cama de impresión incluso con la incorporación de *Brim* desde el software Eiger®**

Si aún con el *Brim* incorporado desde el software sigue despegándose la pieza de la cama de impresión es recomendable incorporar un *Brim manual* directamente desde el modelo Catia®.

Puesto que el *Brim* se va a desechar, una vez cargado el archivo en el software Eiger® se pueden editar las capas correspondientes al *Brim*. Para ahorrar material y tiempo se debe seleccionar el mallado de tipo triangular. La densidad del mallado viene impuesta por lo que se haya seleccionado en la edición de la pieza.

- **Temperatura**

La temperatura es uno de los parámetros que más condiciona el éxito de la impresión.

Durante el proceso de impresión, los cabezales se mantienen a una temperatura constante. Si se produce una pausa de más de cinco minutos, el cabezal vuelve a calentarse al reanudar la impresión.

En el proceso llevado a cabo para introducir la pregrieta en un paralelepípedo se proporcionó calor a la pieza consiguiéndose una adhesión correcta entre las partes. La aplicación de temperatura facilita la adhesión. Al retirar la fuente de calor aparecen tensiones residuales en la pieza.

Por todo esto, mantener la temperatura en un rango controlado y si es necesario aplicarla con una fuente de calor, condiciona el resultado de la impresión.



## 6 Recomendaciones de impresión

---

En este capítulo se recogen recomendaciones de impresión, que se pueden considerar resumen de la experiencia adquirida durante el desarrollo de este trabajo.

- **Impresión de piezas con espesor pequeño y una dimensión mayor que la otra.**

Es recomendable incorporar a estas piezas el *Brim* para que se adhieran correctamente a la cama de impresión.

Si el espesor es pequeño, con el *Brim* que incorpora el software es suficiente como para que no se despegue la pieza de la cama de impresión. En cualquier otro caso incorporar un *Brim* de forma manual desde el diseño Catia®.

- **Colocación de piezas circulares en la cama de impresión.**

Al montar el archivo de impresión situar la pieza en el lugar por defecto, ya que es la posición óptima para que los cabezales de impresión depositen el material.

- **Pegamento en la cama de impresión**

Además de poner pegamento en la zona en la que se va a imprimir la pieza y en donde se va a imprimir el reloj en caso de utilizar filamento de fibra, es recomendable poner un poco en la zona donde los cabezales depositan el primer filamento de nylon en cada impresión para así conservar en buen estado la cama de impresión.

- **Conservación de la cama de impresión**

Provocado por el uso, la cama de impresión sufre daños en su superficie.

Para evitar que sean más acusados y sea necesario sustituirla es recomendable aplicar el *pegamento en barra* de forma más generosa en las zonas dañadas.

Además, al extraer la pieza, inclinar la espátula de forma que los filos no se claven en la cama facilitará la conservación de ésta.

- **Conservación del carrete de fibra cargado en la impresora**

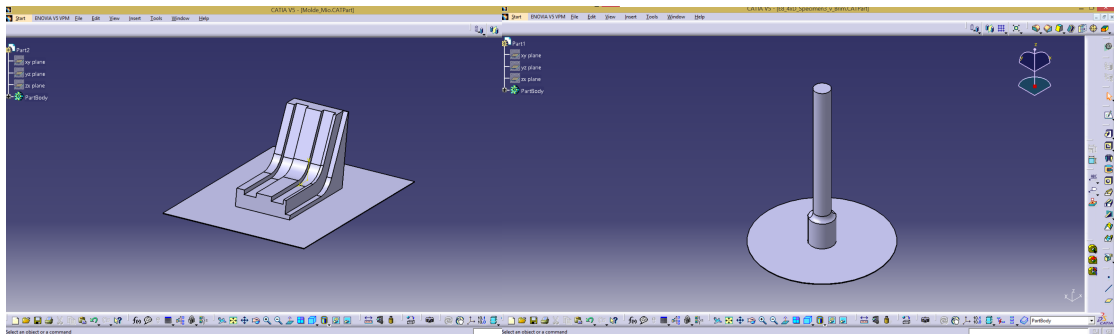
Para evitar la destensión del carrete de fibra durante la impresión de piezas de nylon o en los momentos en los que la impresora no esté funcionando, es recomendable pegar cinta adhesiva en el carrete de fibra. Esto evitará que la fibra se destense poco a poco y/o salga del carrete en caso de vibraciones bruscas durante la impresión de nylon.

No olvidar despegar la cinta cuando vaya a ser utilizado el material.

- **Piezas con gran altura y base de dimensiones reducidas**

Para este tipo de piezas es recomendable incorporar un *Brim* directamente desde el diseño en Catia®, ya que no es suficiente con el que incorpora el software Eiger® al seleccionar la opción.

Como pautas generales para el *Brim manual*, considerar dimensiones mayoradas en función de la dimensión de la pieza en contacto con la cama de impresión. No se puede perder de vista la altura de la pieza en relación con el ancho.



**Figura 6.1** Dimensiones relativas del *Brim* respecto a la pieza.

Se recoge la relación entre dimensiones de los *Brim* manuales utilizados en el presente trabajo (figura 6.1) como ejemplo. En cuanto al espesor, suele ser suficiente con 0.5mm. Para el molde, se ha empleado un *Brim* mayorado 40mm sobre las medidas del molde y para la probeta un diámetro 80mm mayor. En el caso de la probeta es mayor la diferencia por ser la base menor.

Una vez incorporado el *Brim* de forma manual desde Catia®, al introducir el archivo en el software Eiger® es recomendable editar las capas que conforman el *Brim*.

De forma general, considerar el tipo mallado triangular para las capas que conforman el *Brim*. Esto va a hacer que el *Brim* no sea tan rígido y se mantenga adherido a la cama con más facilidad, además ahorrará tiempo y material.

- **Limpieza de la boquilla de nylon**

Con el uso, el nylon que no es capaz de quitar cada 5 capas el limpiador de la boquilla de nylon, se acumula en la boquilla. Para que la impresión con nylon no adquiera un color pardo es necesario retirar el material pegado a la boquilla.

Es mejor retirar el material sobrante con la boquilla caliente, puesto que con la boquilla fría es difícil. Se puede aprovechar el momento inicial de la impresión mientras se está calentando el cabezal de la impresora para despegar cuidadosamente el exceso de material que no es capaz de retirar el limpiador.

## 7 Conclusiones y desarrollos futuros

---

Tras una investigación previa sobre el estado del arte de la tecnología y lo conseguido hasta el momento, se decidió continuar con las líneas de investigación descritas en [21], completando la caracterización de los materiales de impresión y desarrollar métodos para mejorar la calidad de las geometrías impresas.

Con el propósito de equiparar los métodos de fabricación convencionales de materiales compuestos con la fabricación de éstos mediante la impresora Mark One<sup>®</sup>, se han utilizado las normas elaboradas para el ensayo de materiales compuestos para diseñar, fabricar y ensayar especímenes generados mediante impresión 3D.

Debido a la facilidad en la fabricación de geometrías complejas mediante la impresión 3D, una aplicación clara y extremadamente útil es la fabricación de moldes para autoclave. Tras la laminación del material compuesto sobre el molde y la inclusión del conjunto en el autoclave es importante conocer el comportamiento de cada elemento por separado, pero más aún ambos elementos juntos. Los moldes estudiados son de diferentes materiales y geometrías y se laminó tanto con preimpregnados de fibra de vidrio como de fibra de carbono, con ciclos de curado en autoclave distintos.

Tras las labores de mantenimiento realizadas y la experiencia adquirida, se ha conseguido mejorar notablemente la calidad de las piezas impresas.

### 7.1 Conclusiones

El trabajo experimental llevado a cabo satisface los objetivos marcados, ya que se ha conseguido probar prácticamente todo lo inicialmente planificado e incluso profundizar en algunos aspectos. Se han realizado ensayos mecánicos para la caracterización del material y se han fabricado geometrías tridimensionales con mayor o menor funcionalidad.

Como conclusión principal de la caracterización del material, las propiedades de los materiales aptos para imprimir en la Mark One<sup>®</sup> no son comparables a las que presentan los preimpregnados, siendo superiores las de los últimos. La diferencia en las propiedades se debe a que las fibras utilizadas para la impresión no son las mismas que se utilizan en los preimpregnados. Lo mismo ocurre con la matriz, termoestable en el caso de preimpregnado y termoplástica en el caso de la impresora. Es importante destacar que la impresora no tiene mecanismo de compactación, únicamente la existente por la deposición del filamento capa tras capa. La impresora coloca de forma automática la primera y la última capa en nylon, que si bien mejora el acabado superficial, también es cierto que merma las propiedades.

Es necesario destacar el tiempo de fabricación, ya que ha resultado ser verdaderamente limitante en el desarrollo del trabajo. El software Eiger<sup>®</sup> estima el tiempo que durará la impresión, pero tal y como se ha visto en el [capítulo 3](#), no en demasiadas ocasiones coincidía con lo mostrado por la máquina, dependiendo de la complejidad y el material de las piezas a fabricar.

Ligado al tiempo de fabricación se encuentra la cantidad de material empleado en la impresión. La impresora no detecta la falta de material, continúa con la impresión. Por esto, en impresiones que requieran una cantidad de material mayor que la disponible en el momento de la impresión en el carrete, será necesario el cambio de éste. El hecho de tener que supervisar la impresión cuando el carrete esté próximo a agotarse hace percibir el proceso como lento y molesto. Por todo esto, el proceso de impresión 3D es más recomendable para lotes pequeños.

De igual forma, teniendo en cuenta una posible aplicación industrial de esta tecnología, el tamaño máximo de impresión limita las dimensiones de las piezas que es posible obtener. Sin embargo, se está extendiendo la fabricación por fragmentos de menor tamaño con posibilidad de unión posterior.

Como ventaja frente a la fabricación tradicional de laminados de material compuesto destacar que durante la impresión de un laminado con distintas orientaciones entre capas, los ángulos se mantienen de forma mucho más exacta que en la fabricación convencional, ya que es un ordenador el que consigue la orientación.

Destacar también la importancia de conocer en profundidad tanto el software como el hardware con el que se trabaja. Siendo esto así, es bastante más sencillo enfrentar los posibles problemas que puedan aparecer durante el proceso de impresión. Como era de esperar, al comienzo del trabajo el proceso de aprendizaje llevó la mayor parte del tiempo y los avances eran insignificantes, pero con el paso del curso se fue invirtiendo la tendencia.

Para el diseño de las piezas se ha utilizado el módulo *Part Design* de Catia<sup>®</sup>. Se probó a utilizar el módulo de generación de superficies, *Wireframe and Surface Design*, pero al cargar el archivo *.stl* de una superficie en el software Eiger<sup>®</sup> éste dio problemas, por lo que se siguió trabajando con el módulo *Part Design*. Optimizando el diseño desde el software CAD empleado y complementando éste con el proporcionado por el fabricante, se ha conseguido mejorar notablemente la calidad de las piezas impresas.

## 7.2 Desarrollos futuros

En esta parte del capítulo se recogen los desarrollos futuros que se pueden llevar a cabo como continuación del trabajo ya realizado.

Respecto a la caracterización del material:

- Fabricación de probetas para caracterizar las propiedades en el espesor.
- Fabricación de probetas para ensayo de tenacidad a fractura interlaminar. Es necesario incorporar desmoldeante para generar una pregrieta.
- Fabricación de probetas para ensayos de impacto.
- Fabricación de probetas para ensayos de fatiga.
- Estudio de propiedades tras una parada en la impresión.

De acuerdo con [17], tanto la temperatura como la presión son parámetros críticos del proceso que van a determinar las propiedades mecánicas del material compuesto. Por esto sería necesario estudiar la influencia en las propiedades del material de una parada en la impresión, ya que durante esta parada el material ya depositado se enfría y cuando vuelve a comenzar la impresión adquiere temperatura de nuevo.

Geometrías tridimensionales diversas:

- Piezas de nylon con combinación de distintos mallados.
- Molde para autoclave reforzado con vidrio. Sería interesante estudiar el comportamiento con un refuerzo selectivo por zonas frente a un refuerzo pautado.
- Piezas con combinación de distintos materiales y estudio de las propiedades.

Mejoras posibles:

- Utilización de un spray que permita una mejor adhesión de la pieza a la cama de impresión que el que se tiene con el pegamento.
- Descifrado del código de los archivos *.mfp* para personalizar los parámetros de impresión que no se pueden configurar desde el software Eiger<sup>®</sup>.
- Calefactar la cama de impresión para una mejor adhesión de la pieza.

La empresa fabricante y suministradora de la impresora Mark One<sup>®</sup> ha puesto en el mercado este año la nueva versión mejorada Mark Two<sup>®</sup>. La principal diferencia entre ambas es que en la segunda versión la limitación para la impresión con fibra de carbono desaparece. Ahora la fibra de carbono puede orientarse al igual que ocurre con la fibra de vidrio. Este hecho abre la puerta a nuevas aplicaciones y sobre todo a imprimir la geometría deseada con la orientación de las fibras precisa sin tener que mecanizar posteriormente.





# Apéndice A

## Otros trabajos realizados

---

**E**n este apéndice se recoge el desarrollo de otros trabajos llevados a cabo relacionados de forma más o menos directa con la impresora Mark One®.

### A.1 Actualización del firmware

Durante el desarrollo de este trabajo se actualizó el firmware de la impresora en una ocasión tal y como lo indicaba la empresa. La actualización no llevó más de treinta minutos y se introdujeron cambios significativos.

Los cambios apreciados con la actualización del firmware han sido:

- Control más suave del movimiento de la cama durante la nivelación e impresión.
- Nivelación de la cama más precisa.
- Mayor calidad en la impresión de pieza de nylon.
- Sonidos más agradables durante la impresión.
- Mejora en las indicaciones al ejecutar las rutinas desde la pantalla LCD.
- Indicación de calentamiento/enfriamiento de las boquillas durante la impresión.
- Mensaje de enfriamiento de cabezales tras cinco minutos de inactividad durante la impresión.
- Pantalla de bienvenida incorporada.

Por lo tanto, es altamente recomendable actualizar el firmware cada vez que la empresa lo indique.



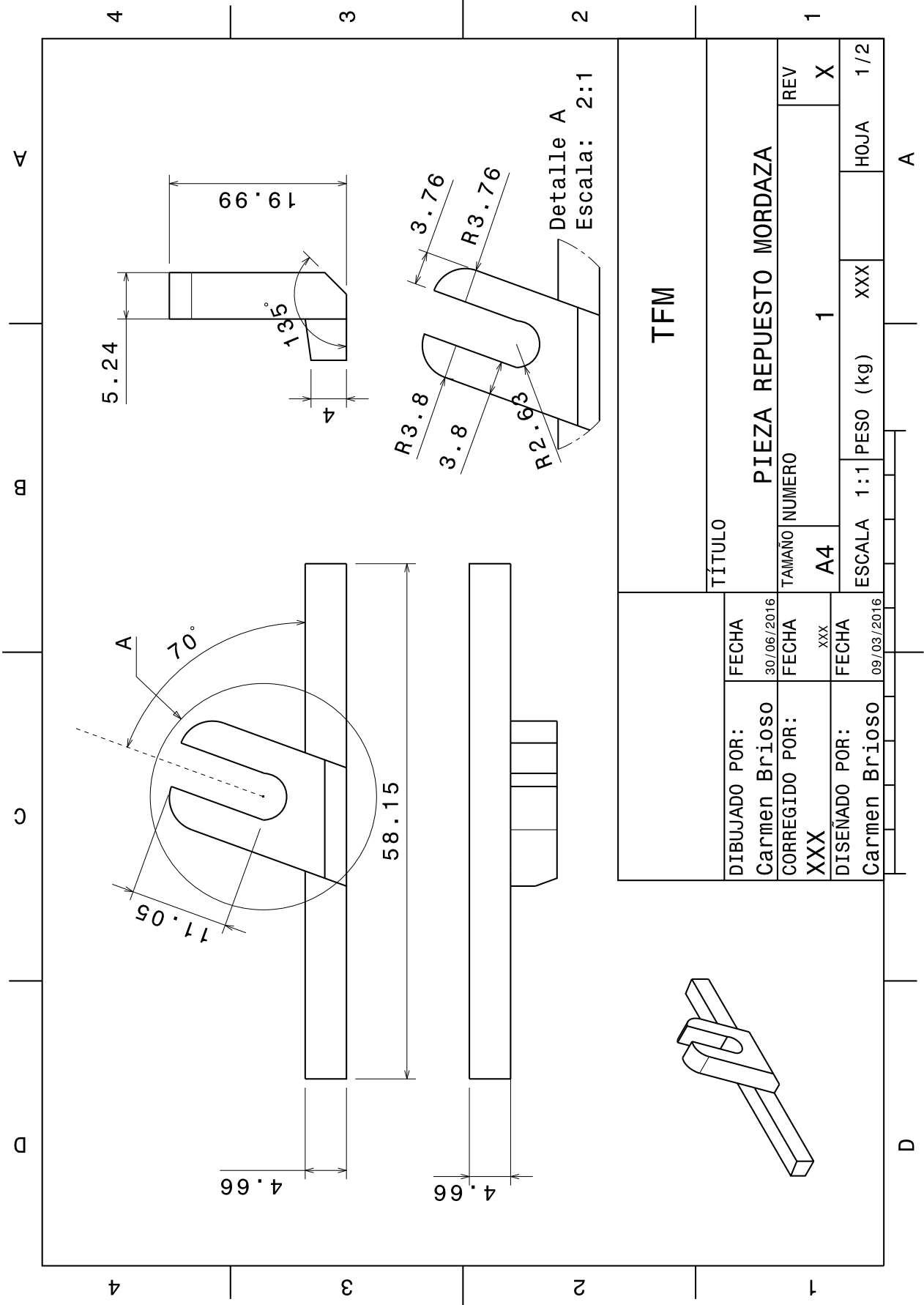
## Apéndice B

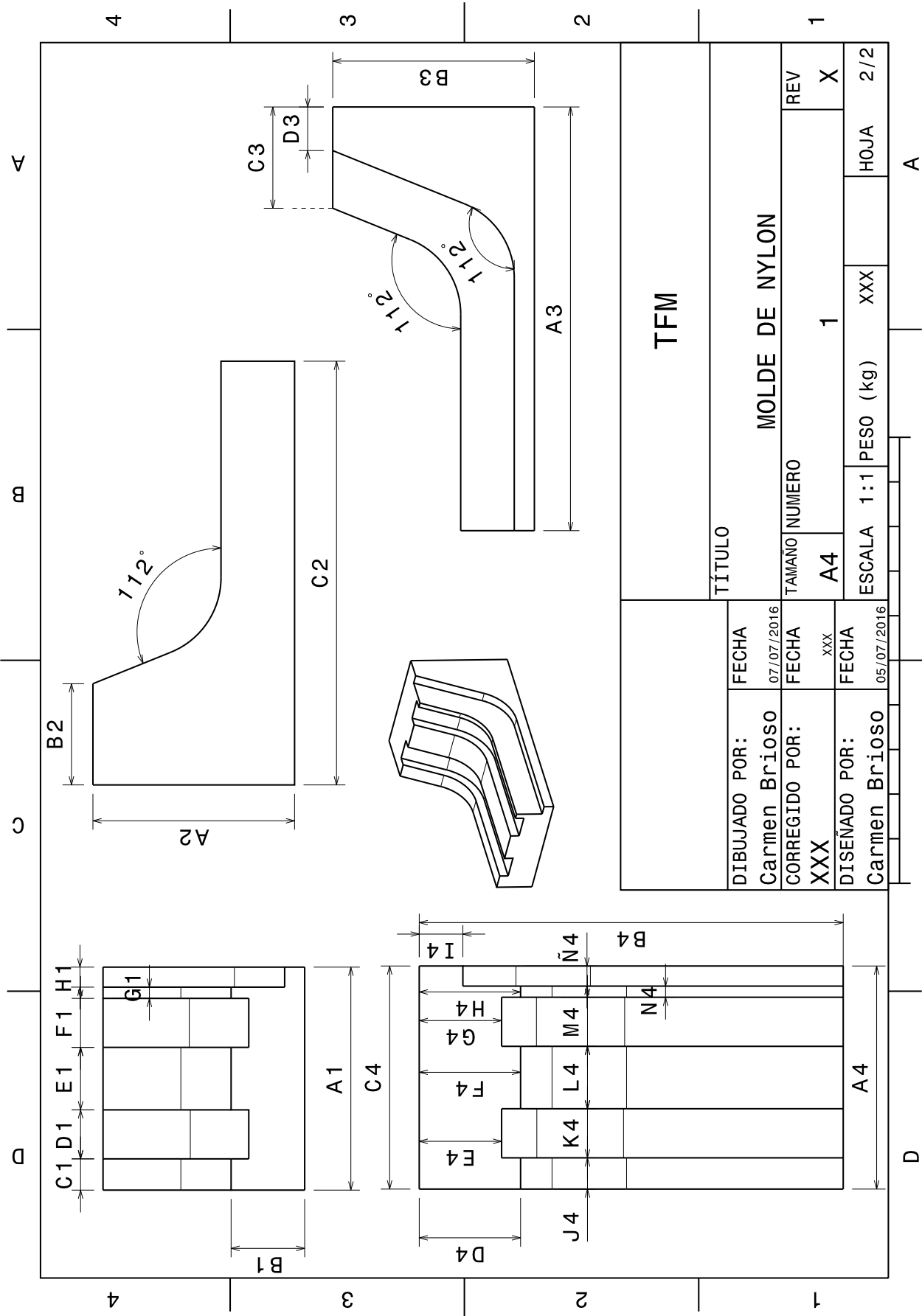
# Planos

---

**E**n este apéndice se recogen los planos de algunas de las piezas que se han fabricado. Las dimensiones son las introducidas en Catia®. Al introducir el archivo *.stl* en el software, automáticamente incorpora una capa de nylon en el contorno de cada capa que imprime, por lo que las dimensiones de diseño y fabricación no son las mismas.

Todas las medidas están en milímetros.





Se recogen las medidas en milímetros del molde de nylon en el diseño en CAD , una vez fabricado y tras el curado en autoclave. El incremento hace referencia a la diferencia en la dimensión del molde antes y después de estar sometido al autoclave.

La columna *Diseño* muestra las medidas en el diseño en Catia®, *Fabricación* las obtenidas una vez fabricado en la impresora y *Autoclave* las medidas tras estar sometido a autoclave.

La diferencia entre *Diseño* y *Fabricación* reside en la colocación automática de nylon por parte de la impresora en las zonas en las que existe mayor detalle y éste se quiere conservar.

La mayor diferencia encontrada es de 0.88mm en la dimensión  $\tilde{N}4$ , que guarda relación con la inclusión de forma automática por parte de la impresora de filamento de nylon para conservar las geometrías de pared delgada.



<b>Dimensión</b>	<b>Diseño</b>	<b>Fabricación</b>	<b>Autoclave</b>	<b>Incremento</b>
A1	50	50.88	51.05	+
B1	16.5	15.75	15.94	+
C1	7	7.98	7.97	-
D1	11	9.72	9.74	+
E1	14	15.51	15.19	-
F1	11	9.97	9.92	-
G1	2.5	3.58	3.90	+
H1	4.5	4.12	4.33	+
A2	45	45.83	45.28	-
B2	22.45	23.35	23.49	+
C2	95	96.19	95.64	-
A3	95	96.01	95.56	-
B3	45	45.19	44.94	-
C3	22.90	23.29	23.38	+
D3	9.51	10.75	11.02	+
A4	51.42	50.73	50.88	-
B4	100.66	95.45	95.47	+
C4	50	50.77	50.84	+
D4	22.45	23.34	23.52	+
E4	18.19	19.06	19.16	+
F4	22.45	23.30	23.31	+
G4	18.19	19.16	19.14	-
H4	22.45	23.21	23.15	-
I4	9.51	10.73	10.64	-
J4	7	7.91	8.08	+
K4	11	9.94	9.47	-
L4	14	14.94	15.05	+
M4	11	10.02	9.46	-
N4	2.5	3.70	3.68	-
Ñ4	4.5	4.26	5.14	+



# Índice de Figuras

---

1.1.	Pastillas fabricadas en impresora 3D	3
1.2.	Prototipo de THOR (Testing High-Tech Objectives in Reality)	4
1.3.	Prototipo del cabezal	5
2.1.	Geometría para fundir posteriormente	7
2.2.	Geometría para fundir fabricada	8
2.3.	Probeta de nylon de una sola capa	8
2.4.	Probeta de nylon de una sola capa direccionada	8
2.5.	Probetas de nylon de una sola capa direccionadas	9
2.6.	Molde y aplicador de presión con nylon fundido	10
2.7.	Probeta de nylon fundida y calcinada	10
2.8.	Mensaje de aviso	11
2.9.	Diseño de los tubos que se fabricarán	14
2.10.	Tubo de nylon con mallado triangular de densidad 100 %	14
2.11.	Detalle del mallado del tubo	15
2.12.	Mensaje de error	15
2.13.	Fallo de la impresión provocado por una dislocación	15
2.14.	Detalle de los distintos mallados utilizados	16
2.15.	Mensaje de utilización de material	16
2.16.	Programación de la parada en el software Eiger®	17
2.17.	Resultados experimentales ensayo a compresión de tubos	18
2.18.	Diferencia de altura durante el ensayo en el tubo 2	19
2.19.	Diferencia de altura durante el ensayo en el tubo 3	19
2.20.	Diseño de un panel en Catia®	20
2.21.	Fabricación del panel de fibra de carbono - I	21
2.22.	Fabricación del panel de fibra de carbono - II	21
2.23.	Geometría panel	22
2.24.	Panel con tensiones residuales	22
2.25.	Antes y después de preparar el panel	22
2.26.	Maquina de ensayos Instron 4482	23
2.27.	Guías del útil	23
2.28.	Diferencia del útil al utilizar bandas extensométricas	24
2.29.	Bandas extensométricas	24
2.30.	Suplemento en las probetas de módulo	25

2.31.	Interfase del suplemento con la probeta impresa	25
2.32.	Probetas para obtener $E_{22}$	26
2.33.	Resultados experimentales fibra de carbono $90^\circ$ - $E_{22}$	27
2.34.	Probetas para obtener $Y_c$	27
2.35.	Resultados experimentales fibra de carbono $90^\circ$ - $Y_c$	28
2.36.	Roturas a compresión probetas fibra de carbono a $90^\circ$ con tacones	29
2.37.	Detalle de rotura <i>compleja</i> en la probeta 3	29
2.38.	Montaje para el cálculo del coeficiente de dilatación térmica	30
2.39.	Estado final de las probetas	31
2.40.	Probeta para ensayo de tracción	32
2.41.	Geometría final para el ensayo de tracción	32
2.42.	Probeta con soportes	33
2.43.	Geometría conseguida	33
2.44.	Probetas de nylon para ensayo de tracción	34
2.45.	Detalle del mallado triangular	34
2.46.	Extensómetro para probetas redondas	35
2.47.	Resultados obtenidos ensayo tracción nylon	36
2.48.	Probetas de nylon ensayadas	37
2.49.	Probetas para fabricar de fibra de vidrio	39
2.50.	Fallo durante la impresión	39
2.51.	Probeta con orificio	40
2.52.	Panel de fibra de vidrio	40
2.53.	Dispositivo utilizado para distribuir la carga uniformemente	41
2.54.	Panel de fibra de vidrio a $0^\circ$ con tacones	41
2.55.	Probetas de fibra de vidrio	42
2.56.	Resultados experimentales fibra de vidrio $0^\circ$	43
2.57.	Roturas a compresión probetas fibra de vidrio a $0^\circ$	44
2.58.	Resultados experimentales fibra de vidrio $90^\circ$	45
2.59.	Modo de fallo a compresión en probetas fibra de vidrio a $90^\circ$	46
2.60.	Geometría a la que generar la pregrieta	47
2.61.	Influencia de la colocación del Teflón	47
2.62.	Pregrieta generada	48
2.63.	Diseño de la pieza para la máquina de ensayos	50
2.64.	Pieza para la mordaza de la máquina de ensayos	50
2.65.	Pieza montada en la mordaza	51
2.66.	Molde de nylon con <i>Brim</i> para laminado posterior	52
2.67.	Molde de nylon con ondas	52
2.68.	Molde de nylon	53
2.69.	Molde y pieza tras curado en autoclave	54
2.70.	Molde y panel tras curado en autoclave - I	54
2.71.	Molde y panel tras curado en autoclave - II	55
2.72.	Diseño del panel escalonado	56
2.73.	Panel escalonado	56
2.74.	Ensayo de tracción del laminado	57
4.1.	Desenroscado del adaptador	69
4.2.	Boquilla atascada con fibra de carbono	70

---

4.3.	Cortado de la fibra	70
4.4.	Extracción de la fibra del tubo Bowden	70
4.5.	Destornillador de vaso hexagonal	71
4.6.	Extremo del tubo Bowden en la extrusora de fibra	72
4.7.	Atasco en la extrusora de fibra	73
4.8.	Calzadores de nivelación y llave Allen	74
6.1.	Dimensiones relativas del <i>Brim</i> respecto a la pieza	80



# Índice de Tablas

---

2.1.	Tiempos empleados en el diseño y fabricación de la pieza 1	10
2.2.	Diámetro 100mm	12
2.3.	Diámetros 95 y 90mm	12
2.4.	Diámetro 85mm	12
2.5.	Diámetros 80, 75 y 70mm	13
2.6.	Diámetros 65, 60 y 55 mm	13
2.7.	Resultados obtenidos	13
2.8.	Dimensiones de los tubos	17
2.9.	Tiempos empleados en el diseño y fabricación de la pieza 2	19
2.10.	Dimensiones probetas fibra de carbono 90° para $E_{22}$	26
2.11.	Resultado experimentales $E_{22}$ -Fibra de carbono	26
2.12.	Dimensiones probetas fibra de carbono 90° para $Y_c$	28
2.13.	Resultado experimentales $Y_c$ - Fibra de carbono	28
2.14.	Resultados del ensayo térmico	30
2.15.	Tiempos empleados en el diseño y fabricación de la pieza 3	31
2.16.	Dimensiones de las probetas de nylon	35
2.17.	Resultados experimentales módulo elástico - Nylon	36
2.18.	Resultados experimentales tensión última - Nylon	37
2.19.	Tiempos empleados en el diseño y fabricación de la pieza 4	38
2.20.	Dimensiones probetas fibra de vidrio 0°	42
2.21.	Resultado experimentales $X_c$ - Fibra de vidrio	43
2.22.	Dimensiones probetas fibra de vidrio 90°	44
2.23.	Resultado experimentales $Y_c$ - Fibra de vidrio	45
2.24.	Tiempos empleados en el diseño y fabricación de la pieza 5	46
2.25.	Tiempos empleados en el diseño y fabricación de la pieza 6	49
2.26.	Tiempos empleados en el diseño y fabricación de la pieza 7	51
2.27.	Tiempos empleados en la fabricación de la pieza 8	55
2.28.	Dimensiones probetas laminado fibra de vidrio	57
2.29.	Tiempos empleados en el diseño y fabricación de la pieza 9	58
3.1.	Características a compresión. Fibra de vidrio	60
3.2.	Características a compresión. Fibra de carbono	60
3.3.	Tiempos estimados por Eiger® vs. Mark One®	61





# Bibliografía

---

- [1] <http://www.impresoras-3d.info/historia-de-las-impresoras-3d/> [Consulta: 12 Agosto 2016].
- [2] <http://www.longitudeonda.com> [Consulta: 02 junio 2016].
- [3] <http://www.stratasys.com/es/industrias/aeroespacial-militar/airbus> [Consulta: 13 Agosto 2016].
- [4] Markforged. *Eiger: Software de Diseño impresora 3D Mark One*. [en línea]. Disponible en: [www.eiger.io](http://www.eiger.io).
- [5] *I+D-E 51, Ensayo de compresión sobre estratificados de fibra de carbono*, 1984.
- [6] *UNE-EN ISO 14126, Materiales compuestos plásticos reforzados con fibra. Determinación de las propiedades de compresión en dirección paralela al plano de laminación*, 2001.
- [7] *ASTM D6641, Standard Test Method for Compressive Properties of Polymer Matrix Composite Materials Using a Combined Loading Compression (CLC) Test Fixture*, 2009.
- [8] *ASTM E8-E8M, Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*, 2015.
- [9] Goyanes A., Buanz A., Basit A., and Gaisford S., *Fused-filament 3D printing for fabrication of tablets*, International Journal of Pharmaceutics, ELSEVIER, 2014.
- [10] Compton B. and Lewis J., *3D-Printing of Lightweight Celular Composites*, Wiley Online Library, 2014.
- [11] Thomas C. and Olga I., *3D printing of multifunctional nanocomposites*, Nanotoday, ELSEVIER, 2013.
- [12] Rambo C.R., Travitzky N., Zimmermann K., and Greil P., *Synthesis of TiC/Ti-Cu composites by pressureless reactive infiltration of TiCu alloy into carbon preforms fabricated by 3D-printing*, Material Letters, ELSEVIER, 2004.

- [13] París F., Cañas J., Marín J.C., and Barroso A., *Introducción al análisis y diseño con materiales compuestos*, Escuela Técnica Superior de Ingenieros, Universidad de Sevilla, 2015.
- [14] Melenka G., Cheung B., Schofield J., Dawson M., and Carey J., *Evaluation and prediction of the tensile properties of continuous fiber-reinforced 3D printed structures*, Composite Structures, ESELVIER, 2016.
- [15] Jee H. and Sachs E., *A visual simulation technique for 3D printing*, Advances in Engineering Software, ELSEVIER, 1999.
- [16] PrüB H. and Vietor T., *Design for Fiber-Reinforced Additive Manufacturing*, Journal of Mechanical Design, 2015.
- [17] Tekinapl H., Kunc V., Velez-García G., Duty C., Love L., Naskar A., Blue C., and Ozcan S., *Highly oriented carbon fiber-polymer composites via additive manufacturing*, Composites Science and Technology, 2014.
- [18] Czyzewsky J., Burzynski P., Gawel K., and Meisner J., *Rapid prototyping of electrically conductive components using 3D printing technology*, Journal of Material Processing Technology, ESELVIER, 2009.
- [19] Justo J., Mesa M.J, Brioso C., Távara L., and Paris F., *Characterization of Composite made by Additive Layer Manufacturing Technologies*, Elasticity and Strength of Materials Group, University of Seville, 2016.
- [20] Namiki M., Ueda M., Todoroki A., Hirano Y., and Matsuzaki R., *3D Printing of continuous fiber reinforced plastic*, International SAMPE Technical Conference, 2014.
- [21] Mesa Quesada M.J., *Puesta a punto de un sistema de fabricación aditiva para materiales compuestos*, Universidad de Sevilla, 2015.
- [22] Fundación COTEC para la innovación tecnológica, *Fabricación aditiva*, Documento COTEC sobre oportunidades tecnológicas, 2011.
- [23] Christ S., Schnabel M., Vorndran E., Groll J., and Gbureck U., *Fiber reinforcement during 3D printing*, Material Letters, ESELVIER, 2014.
- [24] Tian X., Liu T., Yang C., Wang Q., and Li D., *Interface and performance of 3D printed continuous carbon fiber reinforced PLA composites*, Composites: Part A, ESELVIER, 2016.